تكنولوجيا البلازما

د. جمال العريجي





مكتبة الدار العربية للكتاب

تكنولوجيا
البلازما

العريجي، جمال جابر مصطفى
تكنولوچيا البلازما/ جمال جابر مصطفى العريجي. ط 1. ـ القاهرة:
مكتبة الدار العربية للكتاب، 2013.
240 ص ؛ 24 سم.
تدمك: 6 - 694 - 293 - 977 - 978
١ ـ فيزياء البلازما.
أ- العنوان. 530.44
رقم الإيداع: 17555 / 2012

مكتبة الدار العربية للكتاب

16 عبد الخالق ثروت ـــ القاهرة.
تليفون: 23910250 202 +
فاكس: 23909618 202 + ـــ ص.ب 2022
E-mail:info@almasriah.com
www.almasriah.com

الطبعة الأولى: صفر 1434 هـــ يناير 2013م

تكنولوچيا البلازما

د. جمال العريجي

أستاذ فيزياء البلازما التجريبية
هيئة الطاقة الذرية المصرية

مكتبة الدار العربية للكتاب

مقدمــــة

تلعب البلازما دورا متزايدا في الصناعة والتجارة والبيئات المحلية وأيضا في بحوث الفضاء والانصهار النووي. يتسارع تقدمُ التطبيقات الجديدة للبلازما بمعدل متزايد، مثل التطبيقات في مجال الطب، ومعالجة النسيج، والخلايا الشمسية، ومعالجة المياه الملوثة، والورق، والتغليف، والحماية من التآكل، والعديد ما بين ذلك. تكنولوچيا البلازما، جنبا إلى جنب مع غيرها من التقنيات، توفر مفتاحًا للتصدي لهذه التحديات لصالح البشرية. والبحث في هذا المجال يفتح الأبواب أمام الحلول الواعدة التي تسهم في تلبية الاحتياجات المستقبلية من حيث الموارد والعمليات الصديقة للبيئة.

تكنولوچيا البلازما هي العثور على التطبيق في جميع المجالات التي تفرض مطالب عالية على النوعية والإنتاجية، والتوافق البيئي، والدقة والمرونة. وهذا يتعلق بصفة خاصة بتوفير قطاعات الطاقة، والبيئة، والصحة والتنقل. أيضا تكنولوچيا البلازما لها أهمية خاصة في مجالات تطور تكنولوچيا الإلكترونيات، وفي صناعة السيارات والآلات والأدوات، وتقنية الطاقة، وصناعة البصريات، والمنسوجات، والبيئة والطب. ونظرًا للتطبيقات الواسعة المحتملة، تصبح تقنية البلازما من التقنيات الرئيسية التي يمكن من خلالها وضع حلول مبتكَرة طويلة الأمد في جميع المجالات تقريبا. اليوم يمكن أن نرى بالفعل إلى أي مدى تعمل تقنية البلازما على تحسين الجودة والأداء للعديد من المنتجات والعمليات.

على سبيل المثال، يتم استخدام الطلاء بالبلازما لإنتاج أدوات عالية الجودة، بالإضافة إلى بلازما التنظيف والنمشية التي تساعد على إنتاج أجيال جديدة من رقائق أجهزة

الكمبيوتر بأعلى أداء. كذلك تعمل مصابيح البلازما الموفرة للطاقة والصديقة للبيئة، على تخليق مواد جديدة من المواد السامة والنفايات بقيمة الأداة المساعدة المصممة خصيصا لهذا الغرض، بالتخلص منها أو إعادة تدويرها.

تكنولوچيا البلازما وتطبيقاتها تكمن في قدرتها على الابتكار وقيمة الإبداع، وما تتيحه من فرص واسعة النطاق للاستغلال التكنولوچي، والتأثيرات الإيجابية على البيئة. في الوقت الحاضر، وبفضل التقدم الكبير في الفهم العلمي لفيزياء البلازما، تطورت تكنولوچيا البلازما في مختلف قطاعات التقنيات التي تتزايد أهميتها باستمرار. على النقيض من ذلك، ما زال الوعي العام بتكنولوچيا البلازما عند مستوى منخفض جدًّا. ويهدف هذا الكتاب إلى إعطاء لمحة عامة عن تكنولوچيا البلازما في توفير الطاقة وحماية البيئة.

أ. د/ جمال جابر مصطفى العريجي

رئيس قسم البلازما والاندماج النووي

هيئة الطاقة الذرية

المحتويات

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الفصل الأول

لمحة عامة عن البلازما

مقدمة:

البلازما هي حالة متميزة من حالات المادة يمكن وصفها بأنها غاز متأين تكون فيه الإلكترونات حرة وغير مرتبطة بالذرة أو بالجزيء. وتوصف بأنها الحالة الرابعة من حالات المادة. وكلمة بلازما لدى معظم الناس تعني فقط أنها الحالة الرابعة من المادة، وهي توجد فقط في التفاعلات النووية التي تحدث في أعماق النجوم وعلى أسطحها أو تلك التي تحدث في المفاعلات النووية حيث درجات الحرارة العالية والضغط المرتفع، ولكن هناك العديد من الصناعات التكنولوچيا المعقدة جدا تعتمد اعتمادا كليا على استخدام البلازما المصنعة في المختبر، ومن هذه الصناعات: صناعة الدوائر الإلكترونية المتكاملة، وتصنيع الألماس، وعمل رقائق وأسلاك من المواد فائقة التوصيل للكهرباء، وكذلك تحويل الغازات السامة إلى غازات نافعة، هذا فضلا عن دراسة وفهم أسرار الكون الفسيح.

معظم المواد في الطبيعة توجد في ثلاث حالات هي: الحالة الصلبة والحالة السائلة الحالة الغازية، ويمكن تحويل المادة من حالة إلى أخرى إما بتغيير درجة الحرارة أو الضغط، وفي كل هذه الحالات تكون ذرات المادة محتفظة بإلكتروناتها مرتبطة بها بقوى تجاذب كهربية. ولكن في الحالة الرابعة للمادة، وهي البلازما، تكون على صورة غاز ولكن هذا الغاز يحتوي على خليط من أعداد متساوية من الأيونات موجبة الشحنة

وإلكترونات سالبة، هذا الخليط يسمى بالغاز المتأين أو البلازما الكهربية، وحيث إن البلازما حالة غير مستقرة فإن قوة التجاذب تعمل على إعادة اتحاد الشحنات الموجبة والسالبة مع بعضها البعض، وتكون نتيجة إعادة الاتحاد هي انطلاق ضوء ذي تردد معين يعتمد على مستويات الطاقة للذرات المكونة لمادة البلازما. اخترق تأثير تكنولوچيا البلازما تقريبا كل جانب من جوانب النشاط الإنساني خلال السنوات القليلة الماضية. (الجدول 1) يوضح بعض المناطق المختلفة لتكنولوچيا البلازما وتطبيقات ومجالات عملها.

البلازما تتكون من الجسيمات الأولية المشحونة كهربيًّا (الأيونات والإلكترونات والجسيمات المحايدة)، وبالتالي هي حالة متميزة من حالات المادة يمكن وصفها بأنها غاز متأين، تكون فيه الإلكترونات حرة وغير مرتبطة بالذرة أو بالجزيء. يرجع الفضل في تسمية البلازما إلى العالم لانغموير في عام 1928 ربما لأنه رأى أنها تشبه بلازما الدم. أثبتت الأبحاث أن 99٪ من الكون في حالة بلازما. لحسن الحظ، معظم ظواهر البلازما المرصودة تجريبيا تفسر بنموذج البلازما كمائع ؛ وذلك اعتمادا على ميكانيكا الموائع حيث لا يؤخذ سلوك الشحنات المستقلة بعين الاعتبار أثناء الدراسة.

المائع هو المادة التي ليس لها شكل معين بل تأخذ شكل الإناء الحاوي لها وتتميز بقدرتها على الانسياب، ولهذا فإن التعبير يشمل السوائل والغازات وتنقسم إلى قسمين: موائع قابلة للانضغاط وهي الموائع التي تتغير كثافتها بتغير الضغط الواقع عليها مثل الغازات، وموائع غير قابلة للانضغاط وهي الموائع التي لا تتغير كثافتها بتغير الضغط الواقع عليها مثل السوائل. إن الترابط الضعيف أو شبه المنعدم بين جزيئات السوائل والغازات، يجعلها قابلة للاستجابة بسهولة للقوى الخارجية التي تحاول تغيير شكلها، كما أنها تسلط قوة عمودية على أسطح الأوعية الحاوية لها، بحيث إنها إذا وجدت منفذًا فيها، فإنها تنساب وتجري خارجًا، من هنا سميت السوائل والغازات «الموائع».

جدول 1: بعض تطبيقات البلازما (نوع البلازما واستخداماتها)

بلازما الضغط المنخفض غير المتزنة	بلازما الضغط الجوي غير المتزنة	بلازما التيار العالي المتزنة
عمليات البلازما المستخدمة في تصنيع الإلكترونيات	تفريغات الضغط الجوي	اللحام بالقوس الكهربي
دايود التفريغ الوهاجي	التفريغ الإكليلي	لحام المعادن الغاز الخامل
المغيطرون		لحام التنجستن الغاز الخامل
مفاعل الإلكترون الحلقي الرنان (ECR)	التفريغ الإكليلي على خطوط القدرة	اللحام بالقوس المغمور
المفاعل الحلزوني	عمليات الشحن الكهروستاتيكية	مشعل البلازما
المفاعل الهليكوني	الترسيب الكهروستاتيكي	الذوبان بالقوس الكهربي
التفريغ الكهربي ذو الضغط المنخفض و البلازما	تفريغ حاجز العازل	فرن القوس الكهربي ذو الثلاثة أوجه (AC)
المصابيح	تصنيع الأوزون	فرن القوس تحت التفريغ
لمبة بخار الزئبق ذي الضغط المنخفض	التفريغ الجزئي	سخانات قوس الغاز
لمبات عديمة الأقطاب	تفريغ الأسطح	التفريغ الكهربي بتعزيز لهيب الوقود
لوحات عرض البلازما	التفريغ الوهاجي ذو الضغط العالي	تفريغ القوس المقترن حثيا
الليزر الغازي	المعالجة السطحية للأفلام والمنسوجات	الليزر الأيوني

الأشعة الإلكترونية والأيونية الحرة	تعقيم الأجهزة الطبية والتطهير	القواطع بالقوس الكهربي
شعاع الأيون والإلكترون المبخر	الجراحة	قواطع الدوائر الكهربية
الأشعة الإلكترونية ذات القدرة العالية	معالجة عوادم الديزل	توليد الطاقة باستخدام ديناميكا البلازما الممغنطة
عمليات شعاع الأيون	التطبيقات الطبية الحيوية	توليد الكهرباء بالانصهار النووي
التفريغ الوهاجي لمعالجة الأسطح	تعديل الأسطح	الظواهر الطبيعية
الدفع في الفضاء	الخصائص الغروانية	البرق
	الترطيب	التطبيقات في الفضاء
		أفران بالقوس الكهربي (DC)

علم البلازما:

علم البلازما يشمل بلازما الفضاء والبلازما الحركية والبلازما التقنية ونطاق التغيرات الهائلة للبارامترات، مثل: الضغط والمسافة والطاقة. يوجد أسلوب واحد للتمييز بين مختلف مجالات تكنولوچيا البلازما التي كثيرا ما تستخدم البلازما الساخنة أو الباردة اعتمادًا على القيمة النسبية لدرجة حرارة الأيون T_i إلى درجة حرارة الإلكترون T_e (الجدول 2). على الرغم من أنها تستخدم على نطاق واسع ومريح لوصف المجالات الفردية، وهي تزيد من حدة الخلافات. والحالة الشاذة من البلازما في عدة درجات آلاف كلفن يجري وصفها بأنها باردة ليست دائمًا مفيدة. الأوصاف الشائعة الأخرى المستخدمة هي التوهج والإكليل (كورونا) والقوس والحزم. وغالبًا ما تشكل هذه التعريفات المصطلحة عقبات للذين يدخلون المجال أو الذين يعملون بالفعل فيه.

جدول 2: نطاقات الضغط ودرجة الحرارة لكل منه البلازما الباردة والساخنة

البلازما الساخنة ذات درجة الحرارة العالية	البلازما الباردة غير الحرارية ذات درجة الحرارة المنخفضة	البلازما الباردة الحرارية ذات درجة الحرارة المنخفضة
$T_i \approx T_e > 10^6$ K	$T_i \approx T \approx 300$ K $T_i << T_e \leq 10^5$ K Low pressure ~ 100 Pa glow and arc	$T_e \approx T_i \approx T < 2 \times 10^4$ K Arcs at 100 KPa

السبب وراء الخصائص الفريدة للبلازما وأهميتها بالنسبة لعمليات الطاقة العالية تتضح من (الشكل 1)، حيث درجة حرارة الإلكترون T_e لعمليات البلازما المختلفة كدالة في كثافة عدد الإلكترونات. الطاقة والحرارة المتعلقة بثابت بولتزمان تتضح من العلاقة:

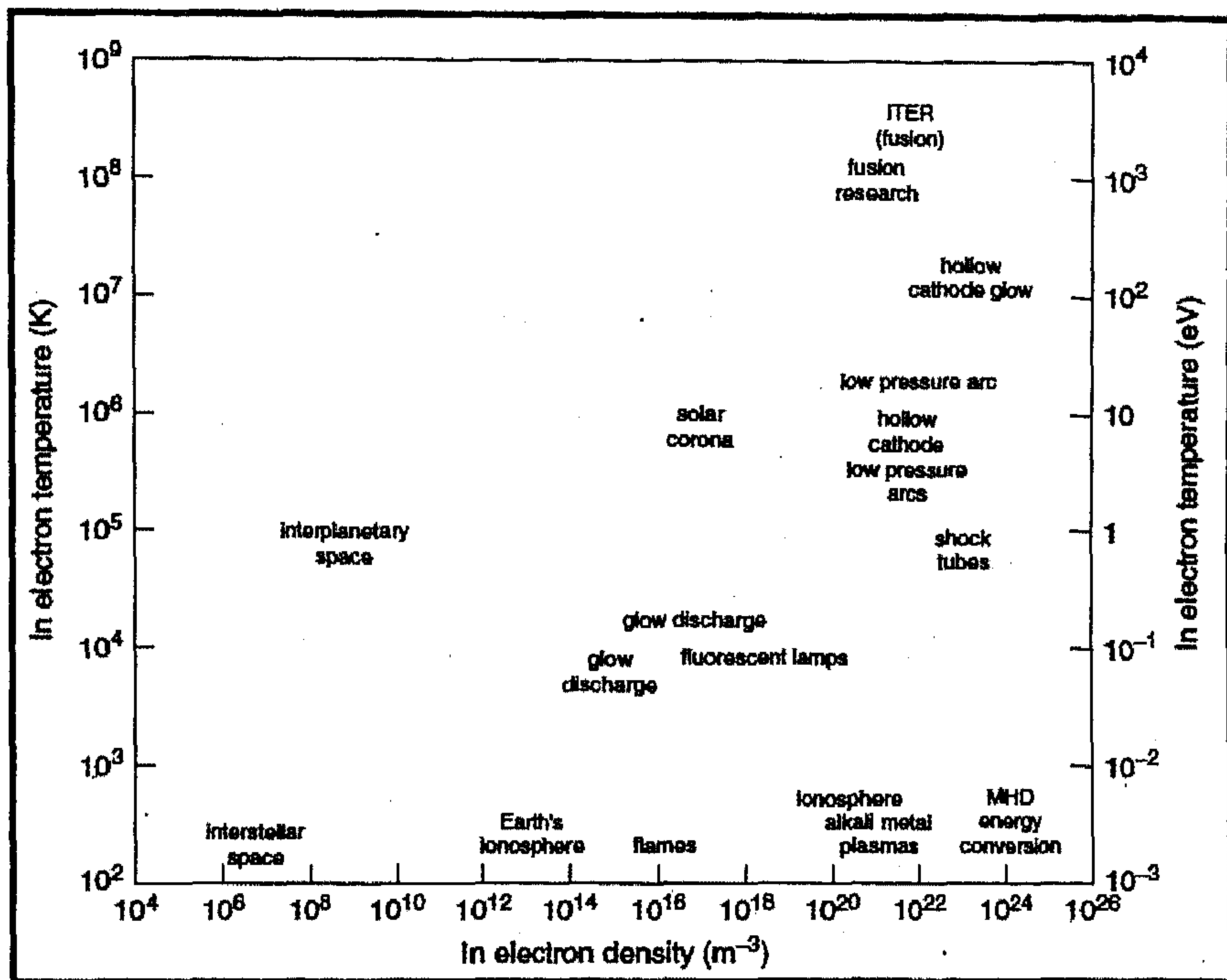
$$\frac{1}{2} mu^2 = K_B T$$

حيث $K_B = 1.38 \times 10^{-23}$ JK^{-1} ثابت بولتزمان

في البلازما الباردة، مثل: مصباح نيون، الطاقة الحركية كلها تقريبا تساوي طاقة إلكترون، وبالرغم من أن متوسط درجة حرارة الإلكترون $\frac{1}{2} mu^2$ قد تكون أضعاف درجة حرارة الغرفة، إلا أن عدد الإلكترونات الساخنة هي نسبة ضئيلة من المجموع وكتلتها الحرارية صغيرة بالمقارنة مع الذرة أو الجزيء، حيث زيادة متوسط درجة الحرارة يكون صغيرا.

الجهد والطاقة لمعظم عمليات البلازما أكبر بعدة مرات من تلك التي في الغازات؛ على سبيل المثال، طاقة الجزيئات في الغازات عند درجة حرارة الغرفة حوالي 0. 025eV وعند ارتفاع درجة الحرارة حوالي 4000K تكون 0.35cV عادة ما يكون من الضروري النظر

في بارامترات البلازما على المستوى الذري فيما يتعلق ببعضها البعض، بما في ذلك حجم الجسيمات، ومقياس الطول والزمن، والكثافة العددية للجسيمات، والقوى بين الجزيئات، والعديد من البارامترات الأخرى. الجزيئات الذرية الرنانة والفرق في ترددات الرنين بين الإلكترونات والأيونات الناشئ عن فرق الكتلة، وجنبا إلى جنب مع طبيعة البلازما المائعة ومدى تأثرها بالمجالات المغناطيسية الثابتة والمتغيرة، يضيف طبقة أخرى من التعقيد. لهذا قد يضيف أيضا نطاقات من ظروف المواجهة، مثل التيار وضغط الغاز.



شكل (1): نطاق البلازما من حيث كل من درجة حرارة الإلكترونات وكثافتها.

بلازما الفضاء:

بلازما الفضاء تتغير من البلازما الكثيفة والساخنة جدا (T > 30000k) في مركز النجوم ومشاعل الكورونا والبقع الشمسية إلى البلازما الباردة، الأقل كثافة مثل الشفق

الشمالي والغلاف الأيوني داخل نظام الجاذبية للأرض. الفضاء غير تام الفراغ ولكن قد يكون ضغط الغاز في الفضاء بين النجوم منخفضا جدا حوالي 3 فمتو باسكال (22.5×10^{-18} Torr). قد تكون كثافة الجسيمات المناظرة في الفضاء ما بين النجوم منخفضة لتصل إلى $10^{6}\ m^{-3}$، أقل من 1×10^{-19} من كثافة الجسيمات عند ضغط يعادل الضغط الجوي على الأرض. يبلغ قطر ذرة الهيدروجين $10^{-10}m$ بنواة ذات قطر نحو $10^{-15}m$؛ وبالتالي تتحرك الإلكترونات والأيونات عبر الفضاء بسرعات عالية عبر مسافات كبيرة. ومن ناحية أخرى النظرية الأساسية للفضاء هي نفس النظرية كما في مجالات أخرى من تكنولوجيا البلازما، على الرغم من ذلك فإن الظروف مثل الضغط والحدود والطاقات قد تكون مختلفة. الدفع الفضائي يشاطر التقنيات الأرضية مثل مشاعل البلازما أو الهليكونات (الرنين الإلكتروني السيكلتروني)، و أيضا التي تستخدم لصنع رقائق الكمبيوتر.

البلازما الحركية:

البلازما الحركية توصف عادة بأنها بلازما ساخنة نظرا لدرجة حرارة الأيون، وهي مساوية تقريبا لدرجة حرارة الإلكترون ($T_e \approx T_i$)، تكون مرتفعة وليس بالضرورة أن يكون الغاز في حالة توازن حراري نظرا لانخفاض درجة حرارة الذرات المحايدة والجزيئات. في البلازما الحركية، متوسط المسار الحر للجسيمات (λ) طويل (أي الفترة الزمنيةτ بين التصادمات طويلة وتردد التصادم ν منخفض)، الإلكترونات والأيونات تميل إلى التصرف بشكل منفصل ويمكن وصف سلوكها كجسيمات فردية في كل من الزمان والمكان. الأشعة من الإلكترونات والأيونات عند الضغوط المنخفضة يمكن اعتبارها بلازما حركية حيث تستخدم في تصنيع أشباه الموصلات وفي اللحام والذوبان. عند الضغوط العالية، البلازما المستخدمة في الانصهار النووي - بالرغم من عمليات التصادم - يمكن وصفها بالبلازما الحركية، تأثيرات تحد الانتشار، والتصادمات والمائع والخصائص الكهرومغناطيسية أيضا يمكن وصفها بأنها ديناميكا البلازما الممغنطة

(MPD). البلازما الحركية ذات الطاقة المرتفعة جدًّا تخضع لمناطق من قبيل الانصهار وأبحاث الجسيمات.

تقنيات البلازما:

عادة يتم تزويد تقنيات البلازما بالطاقة من مصادر الطاقة الكهربائية، على الرغم من إمكانية الإثارة من موجات الصدمة والبلازما الكيميائية التي تعمل في المنطقة من الضغط الجوي إلى حوالي 10Pa (75. 2×10^{-3}Torr). يمكن الحصول على ضغوط الغازات المنخفضة لأقل من 10^{-11} Pa (7. 52×10^{-14}Torr) ورودها في المختبر، لكن يقتصر استخدام البلازما بكثافة الطاقة عند الضغط المنخفض 100×10^{-3} Pa (0. 752×10^{-3}Torr) التي عندها يكون المسار الحر فيها نحو 100 مم.

تقنيات البلازما غالبًا ما يشار إليها بالبلازما الباردة، حيث غالبًا ما تكون درجات حرارة الجسيمات المحايدة والأيونات أقل من درجة حرارة الإلكترون. إذا تغيرت مقاييس الطول والوقت في المجال الكهربائي لفترة طويلة مقارنة مع متوسط المسار الحر وتردد التصادم، فإن تأثيرات التصادم في البلازما تؤدي إلى توزيع إحصائي للسرعات والطاقة. عند ضغط الغاز أعلى من 0. 133Pa (10^{-3} Torr) تناظر كثافة الجسيمات 10^{-19} m^{-3} ، يمكن اعتبار البلازما إحصائيا كمائع شبه مستمر أدنى من هذه القيمة. هناك فاصل كبير بين الجزيئات والسلوك الذي يوصف بدقة أكثر بسلوك الجزيئات الفردية (الإلكترونات الحرة أو الأيونات)، مثل تلك الموجودة في أشعة الإلكترونات والأيونات.

الباليستية البسيطة والنماذج الإحصائية:

من الصعب أن نفهم التعقيدات الهائلة للجسيمات دون الذرية وتفاعلها، ولكن لحسن الحظ النماذج البسيطة كافية لشرح سلوك معظم عمليات البلازما. هذه النماذج تستخدم

معادلات القذائف الباليستية في وصف الإلكترونات والذرات، وهي طريقة بسيطة لفهم الأحداث التي تحدث في البلازما على المستوى الذري. العديد من عمليات البلازما يمكن معالجتها باستخدام الميكانيكا الكلاسيكية، مثل معادلات السرعة:

$$S = ut + \frac{1}{2} ft^2 ، v^2 = u^2 + 2fs$$

معادلات كمية الحركة:

$$m_1u_1 = m_2v_2$$

حفظ الطاقة:

$$\frac{1}{2} m_1u^2 = \frac{1}{2} m_2v^2$$

معادلة الاستمرارية ونظرية الموجات الكهرومغناطيسية البسيطة:

الذرات والجزيئات المكونة للغاز في حالة حركة مستمرة نظرا للانتشار الحراري بسبب فروق درجات الحرارة في الغاز. الانتشار يؤثر في سلوك البلازما عدا الضغوط المنخفضة جدا، ومن الضروري تراكب النموذج الإحصائي على النموذج الباليستي باستخدام متوسط القيم والاحتمالات.

خصائص الانتقال للغاز (الكثافة والسرعة واللزوجة والضغط) لها تأثير كبير على البلازما حيث درجة التأين تكون منخفضة وعدد التصادمات يكون مرتفعًا. تأثيرات العدد الكبير من التصادمات تقود لعدد من توزيع السرعات نحو التوزيع الإحصائي، مثل: توزيع ماكسويل. الحل الحركي الذي يصف السرعة والموضع كدالة في الزمن مناسب حيث المقاييس الزمنية دوال ذات أهمية مثل انتشار الموجات، والاستقراريات وتأثيرات أخرى غير توزيع ماكسويل أقصر بكثير من زمن الاسترخاء أو التوازن الحراري. على سبيل المثال: أشعة الجسيمات، وبعض بلازما الضغط المنخفض، ومفاعلات الانصهار الحلقية (توكوماك) تندرج في هذه المنطقة.

السلوك الإحصائي:

حيثما يوجد عدد كبير جدا من الجسيمات في وسط متماثل (حراري وتوازن شحنات) فإن توزيع السرعة يحدد إحصائيا ويعطى بمعادلة ماكسويل:

$$f = (u) = \frac{dn_u}{du} = \frac{4n}{\pi^{\frac{1}{2}}}(\frac{m}{2K_BT})^{\frac{3}{2}} u^2 \exp(-\frac{mu^2}{2K_BT})$$

حيث T متوسط درجة الحرارة، u السرعة لمدى du، n الكثافة العددية للجسيمات، m كتلة الجسيم و ثابت بولتزمان: $K_B = 1.38 \times 10^{-23}$

طاقة حركة الجسيم تعطى بالعلاقة:

$$\frac{mu^2}{2} = K_B\ T$$

توزيع سرعة ماكسويل (شكل2) يبين احتمالية الجسيمات المحايدة التي لها قيمة محددة من السرعة. قمة السرعة المحتملة في التوزيع الماكسويلي تعطى بالعلاقة:

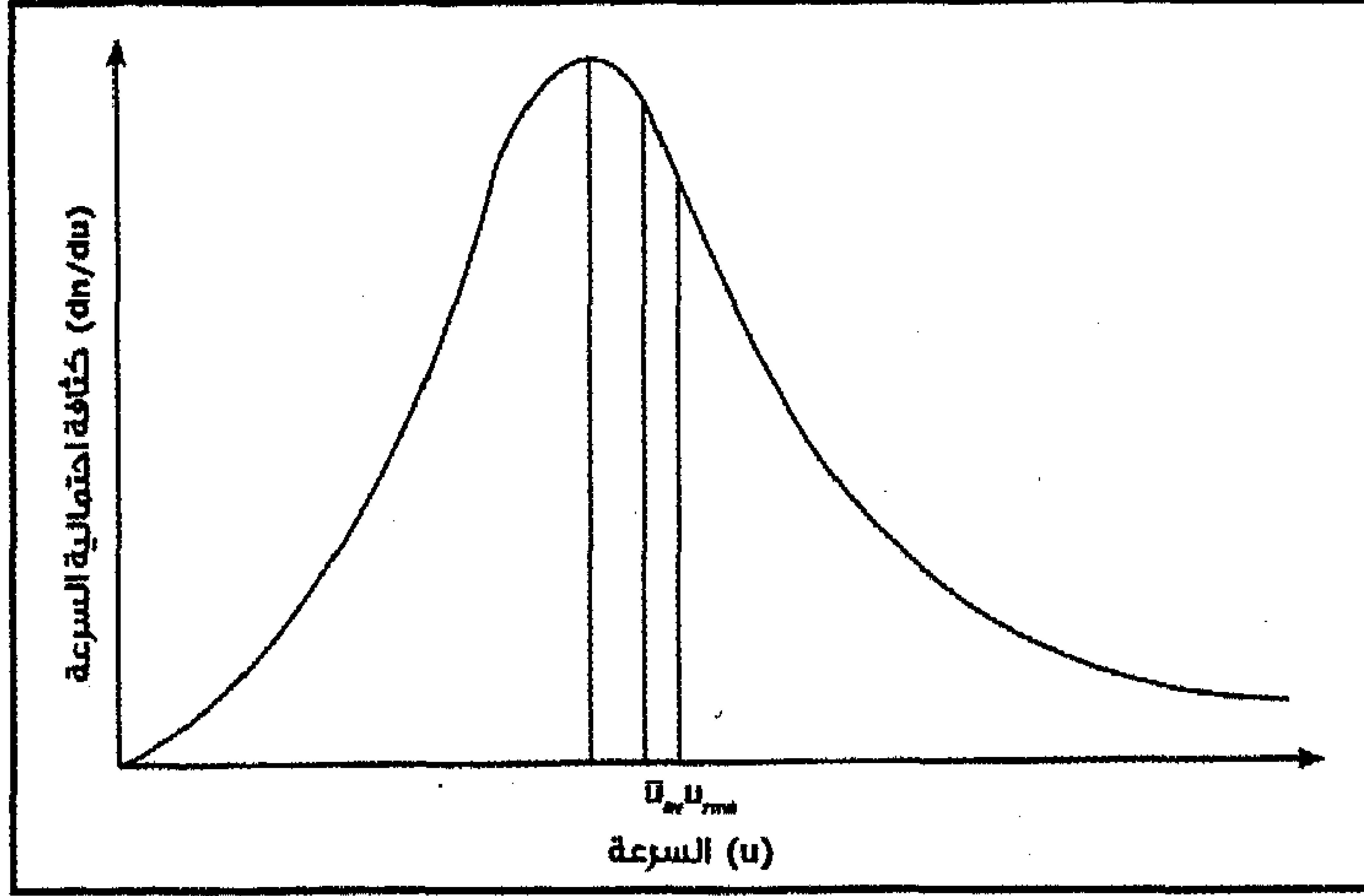
$$u_m = (\frac{2K_BT}{m})^{\frac{1}{2}}$$

متوسط السرعة:

$$\bar{u}_{av} = (\frac{8K_BT}{\pi\ m})^{\frac{1}{2}}$$

متوسط الجذر التربيعي:

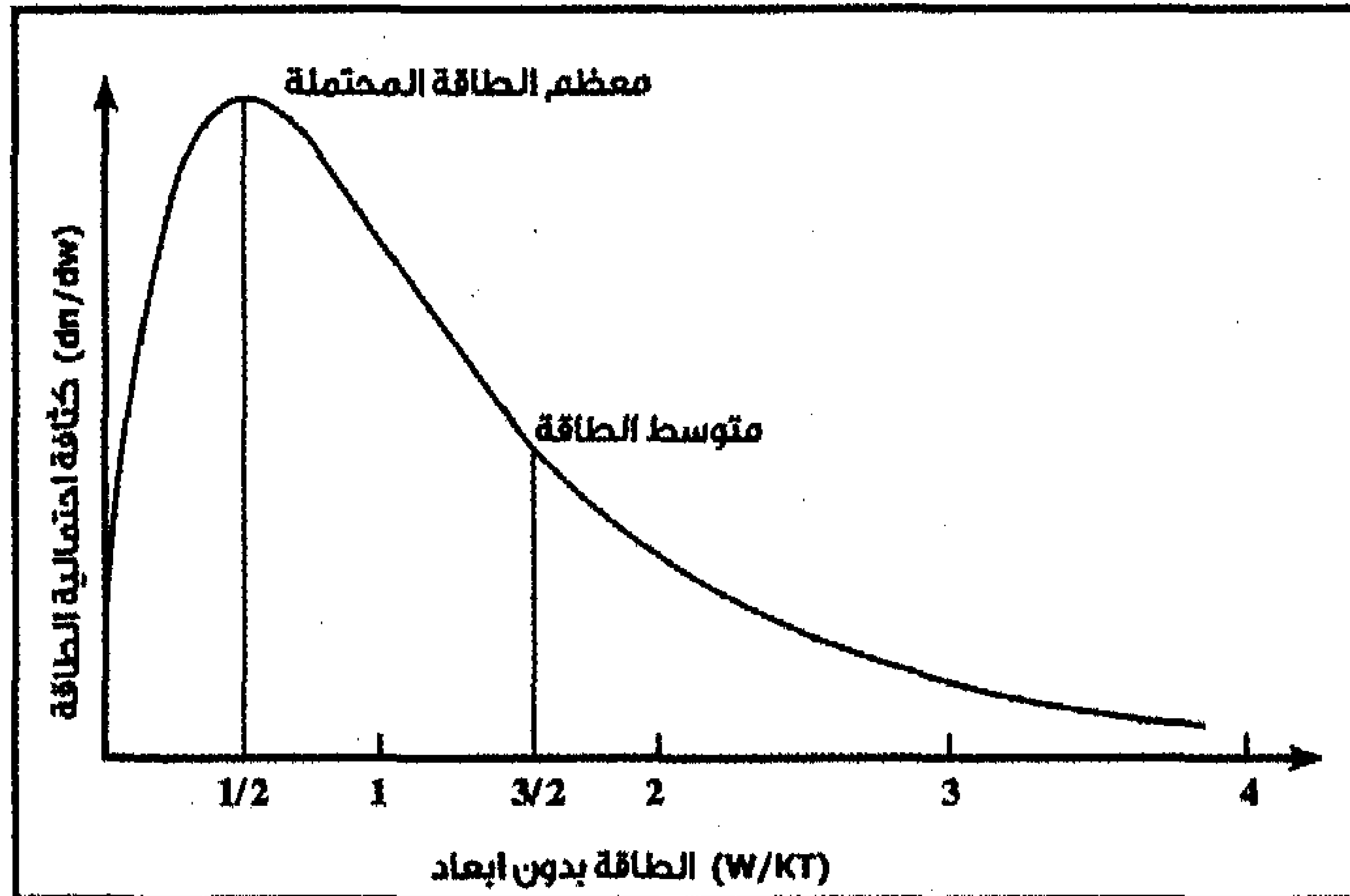
$$\bar{u}_{rms} = (\frac{3K_BT}{m})^{\frac{1}{2}}$$



شكل(2): التوزيع الماكسويلي للسرعة يبين القيم المتوسطة، ومتوسط الجذر التربيعي، وذروة السرعات المحتملة.

توزيع ماكسويل – بولتزمان للطاقة $f(w)$ (شكل 3) كدالة في توزيع الجسيم المحتمل مشتق من توزيع السرعة:

$$f(w)=\frac{dn_w}{dw}=\frac{2n}{\pi^{\frac{1}{2}}}\frac{w^{\frac{1}{2}}}{(2K_BT)^{\frac{3}{2}}}\exp(-\frac{w}{2K_BT})$$



شكل (3): توزيع طاقة ماكسويل- بولتزمان

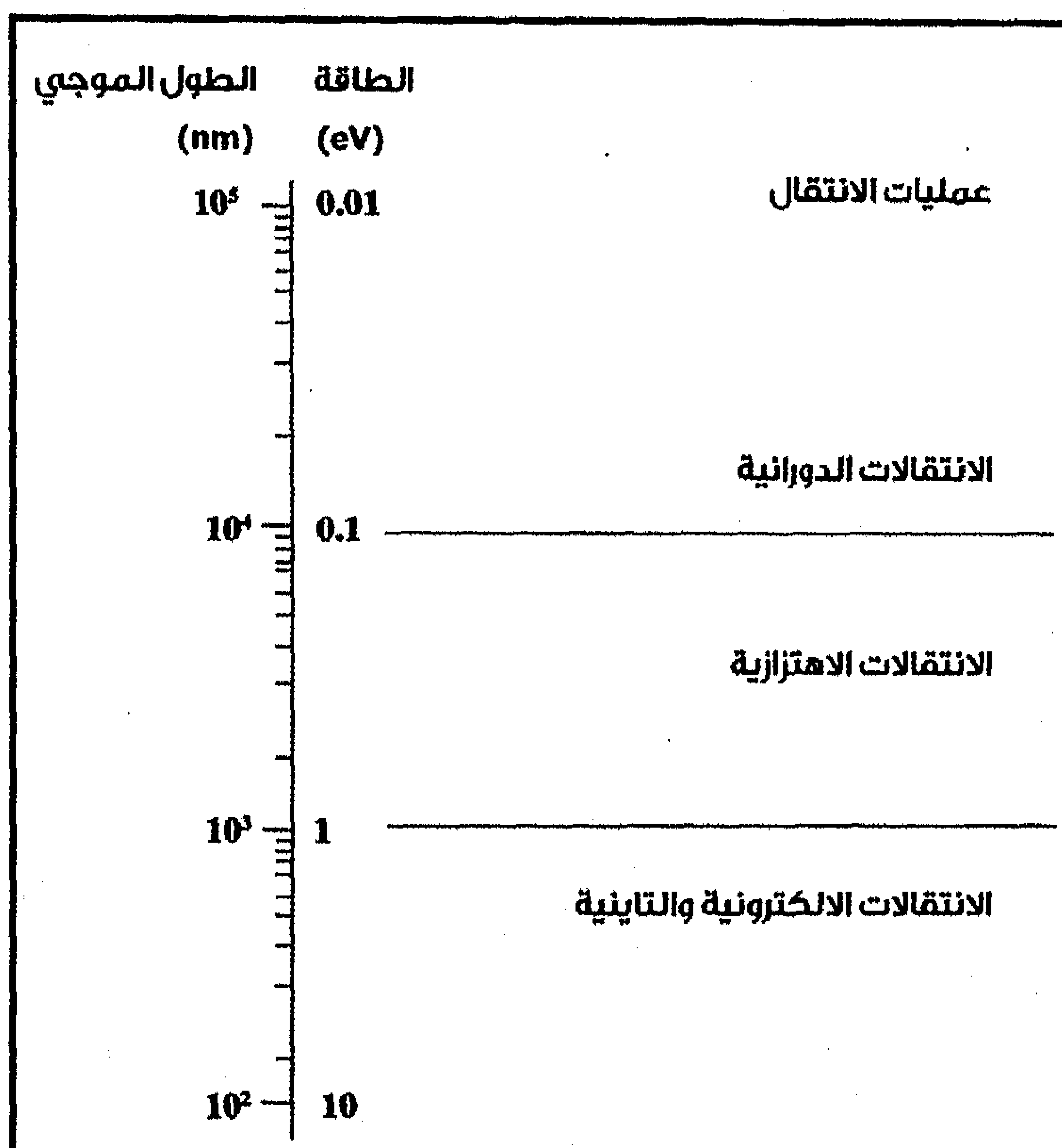
توزيع سرعات الجسيمات المشحونة المائلة لتكون غير ماكسويلي ناشئة عن تأثير المجال الكهربي والجسيمات المشحونة المجاورة. ومع ذلك تطبق بحذر في المجالات الكهربية الضعيفة:

1- شدة المجال الكهربي منخفض إلى حد أنه يمكن إهمال التصادمات غير المرنة.

2- تردد المصدر أقل بكثير من تردد التصادم.

3- تردد التصادم لا يعتمد على طاقة الإلكترون.

الشكل (4) يبين مستويات الطاقة للانتقالات الذرية والجزيئية المختلفة. الطاقة المكتسبة بالإلكترون تسرع خلال جهد قدره 1 فولت هو 1 إلكترون فولت. توزيع ماكسويل- بولتزمان يوضح عددا صغيرا من الجسيمات ملائمة بطاقة كافية للتأين.



شكل (4): الطاقة الجزيئية والذرية المصاحبة بانتقالات الطاقة المختلفة.

ويمكن القول بأن 1 إلكترون فولت يناظر متوسط سرعة البروتـون 1.38×10^{4}m/s وللإلكترون 593km/s أو درجة حرارة قدرها 11600k. وحدات الطاقـة هـي إلكـترون فولت 1eV=11600k.

على المستوى الجزيئي، الطاقة المطلوبة لتغير الجزيء من الحالة الصلبة إلى السائلة تحتاج لطاقة قدرها 0.01eV ولكن تأين جزيء الغاز يتطلب على الأقل 1eV عند درجة حرارة الغرفة، طاقة حركة البروتون (نواة ذرة الهيدروجين) حوالي 0.04eV وفقط 0.5eV عند درجة حرارة 4000K. الطاقة المطلوبة لفصل الإلكترون عن البروتـون الفـردي لتأينـه حوالي 13.6eV بمعنى احتمالية الجسيم المحايد ذات طاقة عالية بشكل كافٍ للتأين غالبـا عند درجات الحرارة العالية تكون منخفضة جدا.

التصادمات بين الجزيئات:

التصادم بين الجزيئات قد يكون مرنًا، وفي هذه الحالة هـو تصـادم يـتم بـين جسـيمين حيث يبقى الجسيمان منفصلين بعد التصادم، وهذا النوع من التصـادم يعمـل عـلى حفـظ طاقة الحركة أي لا يحدث تغير فيها قبل وبعد التصادم، وقد يكون غير مرن، وهو تصـادم لا تنطبق عليه قوانين حفظ الطاقة الحركية؛ وذلك لأن الطاقـة قبـل التصـادم لا تسـاوي الطاقة بعد التصادم أي يكون هناك فقد في الطاقة، إما على شكل حـرارة أو ضـوء ولكـن تعمل على حفظ كمية الحركة؛ وفي كلتا الحالتين، يتم تبادل الطاقة. الطاقة لكـل تصـادم، وتردد التصادم بين الجزيئات الذرية يؤثر على المعدل الذي يمكن أن تكون الطاقـة مقترنـة بالبلازما أو التحرر منها. كتلة إلكترون، m_e، 9.11×10^{-31} كجم. الكتلـة الذريـة لنـواة ذرة الهيدروجين (بروتون)، m_p ، 1.67×10^{-27} كجم. صغر كتلة الإلكترون فقط يؤدي إلى إهمال تبادل طاقة الحركة بين الإلكترونات في التصادم المرن وتحفـظ الجسـيمات مقـدار كمية حركتها ولكن يتغير اتجاهها. جزء من الطاقة قـدره k ينتقـل في التصـادم المـرن مـن الجسيم ذي الكتلة m لجسيم آخر كتلته M يمكن أن يشـتق مـن معـادلات كميـة الحركـة وطاقة الحركة. للتصادم مع المحور لجسيمين هو:

$$k = \frac{\frac{4m}{M}}{(1+\frac{m}{M})^2}$$

عندما m >> M مثل التصادم بين الإلكترون وجسيم محايد نحصل على:

$$k \approx \frac{4m}{M}$$

في حالة التصادم المرن بين الإلكترون وذرة الهيدروجين الساكنة (بروتون)، $k = 2m/M$ تنتقل الطاقة من الإلكترون بنسبة 1 .0٪ وفي حالة التصادم غير المرن يتحول جزء من الطاقة ليصبح $M/(m + M)$ وتنتقل الطاقة بأكثر من 99٪ . تردد تصادم البروتون في الهواء عند الضغط الجوي في حدود $7\times10^{9}s^{-1}$ متوسط المسار الحر (المسافة بين التصادمات) للذرة أو الجزيء في الهواء عند الضغط الجوي تقريبا $6\times10^{-8}m$ ويقل عكسيا مع الضغط، أي عند 100×10^{-3} Pa (0. 752×10^{-3} Torr)، متوسط المسار الحر في حدود60mm.

الحرارة:

تقاس حرارة البلازما بالكلفن أو إلكترون فولت، وهو قياس للطاقة الحركية الحرارية لكل جزيء. تكون الإلكترونات في الكثير من الأحيان قريبة من حالة التوازن الحراري لأن الحرارة تكون واضحة المعالم، حتى بحالة الانحراف في معادلات ماكسويل لتوزيع الطاقة، ومثال ذلك: الأشعة فوق البنفسجية، أو الجسيمات النشطة، أو المجال الكهربائي القوي. وبسبب التفاوت الكبير بالحجم، تتوازن الإلكترونات عن طريق الديناميكا الحرارية وحدها وبشكل أسرع من أن تتحول إليها من خلال الأيونات أو الذرات الطبيعية. لهذا السبب تكون حرارة الأيونات مختلفة عن حرارة الإلكترونات وعادة ما تكون أبرد، وهذا أكثر ما يظهر في بلازما الأيونات الضعيفة حيث تكون الأيونات قريبة من الحرارة المحيطة.

استنادا للحرارة المرتبطة بالإلكترونات والأيونات والجسيمات المحايدة فإن البلازما يمكن تصنيفها على أنها حرارية أو غير حرارية:

- لبلازما الحرارية: تكون فيها الإلكترونات والأجسام الثقيلة بنفس درجة الحرارة، أي تكون بحالة توازن حراري مع بعضها البعض.
- البلازما اللاحرارية: تكون الأيونات والجسيمات المحايدة بحالة الحرارة المحيطة بها بينما ترتفع درجة حرارة الإلكترونات بشكل أكبر بكثير.

تتحكم الحرارة في درجة تأين البلازما، خصوصا أن تأين البلازما محدد بدرجة حرارة الإلكترونات المرتبطة بطاقة التأين وبدرجة أضعف بالكثافة. أحيانا يشار إلى البلازما على أنها حارة إذا كانت متأينة بدرجة تامة، أو باردة إذا كان التأين جزءًا بسيطًا حيث درجة حرارة الإلكترونات تكون حوالي عدة آلاف من الدرجات المئوية. وفي هذا الصدد عادة ما تكون البلازما المستخدمة في تكنولوچيا البلازما باردة.

تصادمات كولوم:

قانون كولوم في الفيزياء يعطي العلاقة بين القوة الكهربائية ومقدار هذه الشحنات الكهربية، والمسافة بينهما (توصل إليه العالم الفرنسي شارل كولوم عام1795) وهو ضروري لتطوير النظرية الكهرومغناطيسية.

نص قانون كولوم:

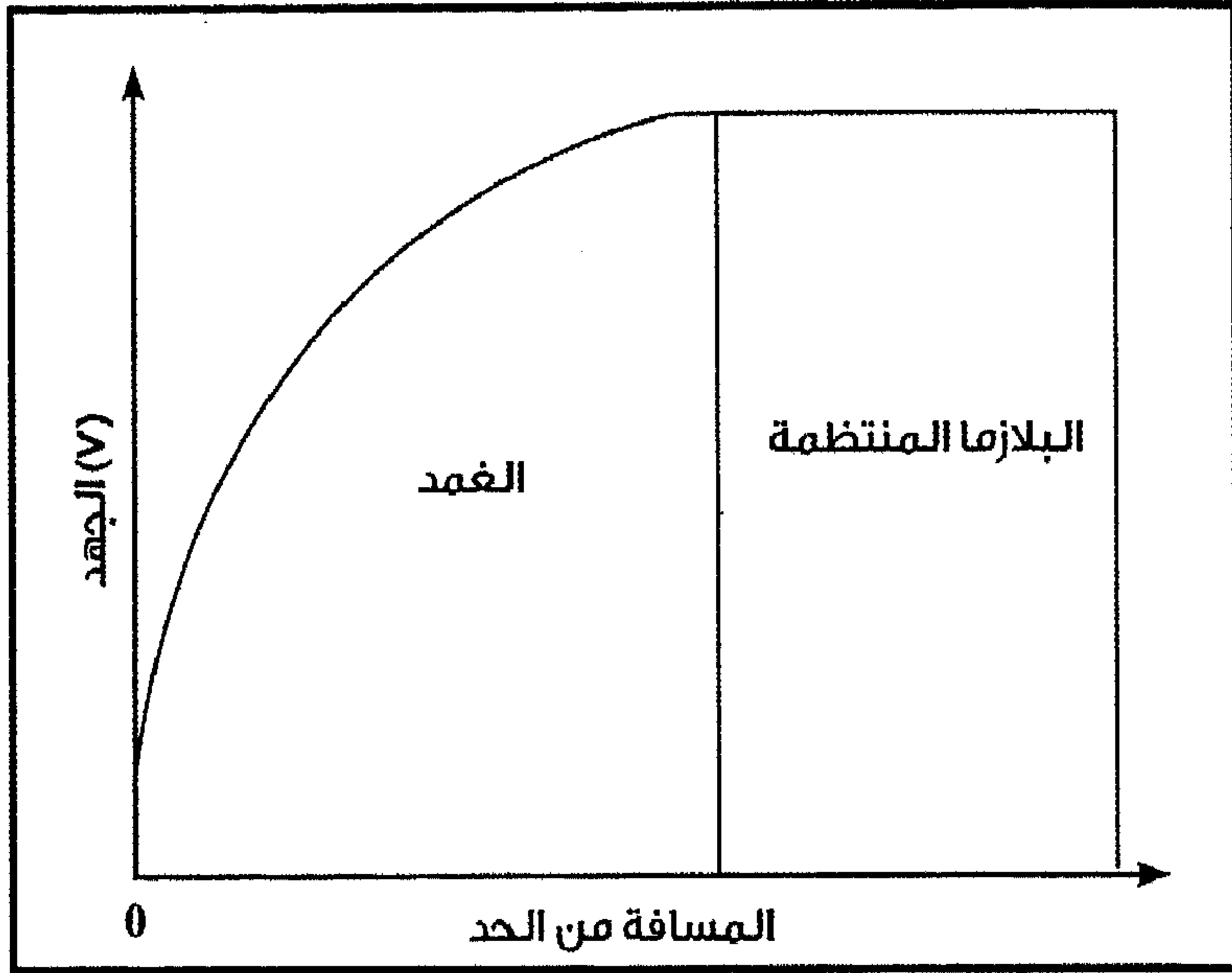
«تؤثر شحنتان نقطيتان ساكنتان على بعضهما في الخلاء بقوتين متعاكستين محمولتين على الخط الواصل بينهما، شدتها المشتركة تتناسب طرديًّا مع القيمتين المطلقتين لكل منهما، وعكسيًّا مع مربع المسافة بينهما». قوى كولوم هي القوة الكهروستاتيكية بين شحنتين q_1 and q_2؛ بينهما مسافة r تعطى بالعلاقة الرياضية:

$$\frac{q_1 q_2}{4\pi r^2 \varepsilon_0}$$

تتجاذب الشحنات العكسية برغم القوى الناشئة عن الجسيمات المشحونة الأخرى لمنع التصادم. وقوى كولوم بين الجسيمات المتقاربة تكون قوية وربما تكون أكبر من تأثير المجال الكهربي المسلط. إزاحة الشحنات عن موضع اتزانها يؤدي إلى تذبذبها عند تردد رنين الإلكترونات أو الأيونات. حدوث العديد من التصادمات عند الضغط العالي يتسبب في حجب تأثير المجال الكهربي ويقلل جهده. الانتشار مثنوي القطبية ambipolar diffusion يؤخر الإلكترونات ذات السرعة العالية نظرا لتأثر السرعات الانجرافية لكل من الإلكترونات والأيونات بالمجال الكهربي بينهما. عند الضغط المنخفض – على سبيل المثال – المجال الكهربي الخارجي الكبير قد يكون له تأثير أكبر من قوى كولوم في حزم الإلكترونات والأيونات.

الحدود والأغلفة:

تقنيات البلازما لها حدود معرفة بجدران الوعاء، أقطاب أو الغاز المحيط وجسيمات نشطة بإعطائها الطاقة بالتصادم عند الحدود. الأسطح المعزولة أو الحدود سرعان ما تكتسب شحنات لتشكيل غلاف، يؤدي إلى تنافر الشحنات المتشابهة. الشكل (5) يوضح تغير الجهد في غلاف البلازما مع المسافة من الحافة. تركيز الشحنة المحلية من الأيونات الموجبة فوق منطقة تبلغ بضع عشرات من الميكرون قابلة للمقارنة مع متوسط المسار الحر للجسيمات. غلاف الأيونات يسبب تدرجًا في الجهد بين البلازما والحدود ويحجب البلازما، التي تصبح تقريبا محايدة الشحنة. وتعرف قدرة الغلاف على حجب البلازما من الاضطراب بنصف قطر ديباي. نصف قطر ديباي عادة صغير جدا بالمقارنة مع الأبعاد الرئيسية للعملية عند القيم العالية لدرجة حرارة الإلكترونات أو القيم المنخفضة لكثافة الإلكترونات باستثناء العمليات التي تتم على نطاق النانومترية على سبيل المثال.



شكل (5): رسم توضيحي لتوزيع الجهد في الغمد عند الحدود.

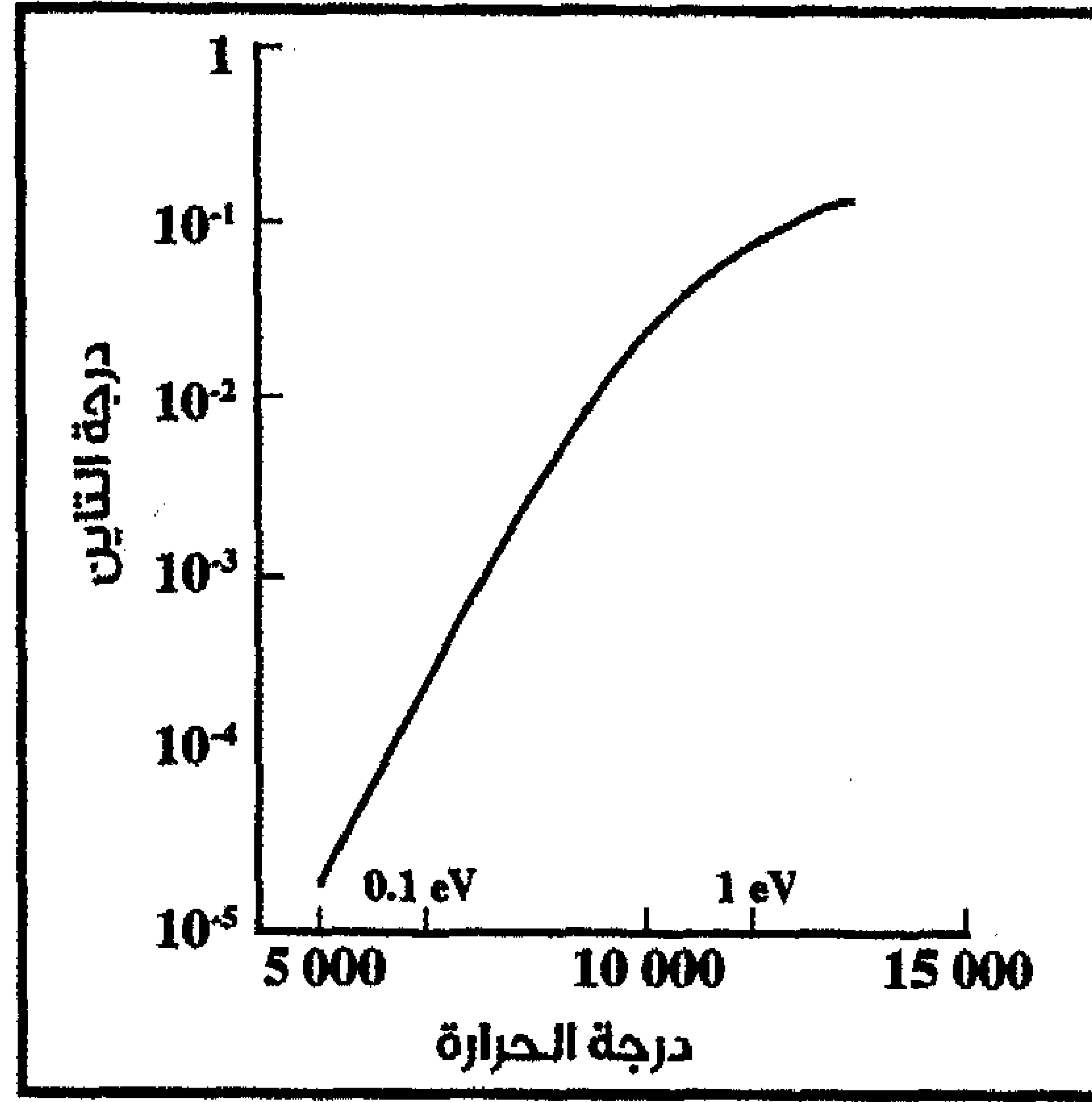
درجة التأين:

التأين ضروري لتكوين البلازما، وكثافة البلازما هي الكثافة العددية للإلكترونات، بمعنى كمية الإلكترونات المتحررة لكل وحدة حجم. درجة التأين هي كمية الذرات التي خسرت أو كسبت إلكترونات، وتكون الحرارة هي العامل القوي المتحكم بذلك.

درجة التأين α تعرف بالمعادلة:

$$\alpha = n_e / n_t$$

حيث إن n_e كثافة الإلكترونات و n_t كثافة العدد الكلي للذرات أو الجزيئات غير المتأينة. تغير درجة التأين مع درجة الحرارة موضحة بالشكل (6). البلازما مع درجة قليلة من التأين تسمى «بلازما باردة».



شكل (6): تغير درجة التأين للغاز الذري عند الضغط الجوي.

الجهد الكهربي:

بما أن البلازما موصل قوي للكهرباء فمقادير الجهود الكهربية سوف تأخذ دورًا مهمًّا نظرا لوجود الجهد ما بين الجسيمات المشحونة في الفراغ. فإذا وضع قطب أو قطب كهربي في البلازما فإن الجهد بشكل عام سيتحرك بقوة إلى مادون جهد البلازما بسبب نشوء ما يسمى غشاء ديباي. بسبب جودة التوصيل الكهربي فإن المجال الكهربي للبلازما يصبح صغيرًا جدًّا، وهذا يفضي إلى مفهوم مهم لشبه الحياد الذي يقول: إذا كانت كمية التقارب الحقيقية جيدة فالمفروض أن كثافة الشحنات السالبة تعادل كثافة الشحنات الموجبة خلال مساحة كبيرة من البلازما. بهذه الحالة الخاصة تكون الطبقات المزدوجة متشكلة وتوزيع الشحنات يمكن أن يمتد إلى عشرات من أطوال ديباي. مقادير الجهد والمجالات الكهربية يجب أن تكون محددة بالوسط المحيط بدلًا من إيجاد صافي كثافة الشحنات. يمكن حساب المجال الكهربي من الكثافة من العلاقة:

$$E = (k_B T_e / e)(\nabla n_e / n_e)$$

كثافة البلازما غير المحايدة يجب أن تكون قليلة أو صغيرة جدا و إلا ستنتشر بطريقة الكهرباء الساكنة غير المرغوب فيها. في البلازما الكونية، حاجز ديباي يمنع المجال الكهربي من التأثير المباشر على البلازما خلال مسافة كبيرة (أبعد من طول ديباي). ظهور الجسيمات المشحونة في البلازما يؤدي إلى توليد مجال مغناطيسي تتأثر به، وهذا يسبب سلوكًا معقدًا مثل نشوء الطبقات المزدوجة التي تفصل الشحنات عن بعضها البعض خلال العشرات من أطوال ديباي. ديناميكا البلازما تتأثر بالمجالات المغناطيسية سواء الخارجية أو المنتجة ذاتيًّا.

المغنطة:

البلازما المغنطة هي التي تتولد في مجال مغناطيسي قوي لدرجة أنه يؤثر على حركة الجسيمات المشحونة. المعيار الكمي المشترك هو أن الجسيم بالمتوسط يكمل على الأقل دورة كاملة حول المجال المغناطيسي قبل الاصطدام أو الالتحام (بمعنى $\omega_{ce} / \nu_{coll} >$ 1حيث إن ω_{ce} هو عدد دورات الإلكترون حول المجال، وν_{coll} هو معدل اصطدام الإلكترون). عادة ما تكون الإلكترونات ممغنطة والأيونات غير ممغنطة. البلازما المغنطة (المغناطيسية) تكون مختلفة الخصائص بمعنى أن هناك خصائص تتوازى مع المجال المغناطيسي وهناك عمودية عليها. ورغم أن المجال الكهربي بالبلازما يكون ضعيفًا بسبب قوة التوصيل، لكنه يتوافق مع حركة البلازما بالمجال المغناطيسي بالمعادلة التالية:

$$E = -v \times B$$

حيثE هو المجال الكهربي و v السرعة و B المجال المغناطيسي، وهذا المجال الكهربي لم يتأثر بحاجز ديباي، ولكن على أطراف البلازما يكون المجال الكهربي أساسًا (صفر).

رنين البلازما:

يحدث «الرنين» في البلازما عند الترددات العالية بترددات مختلفة تناظر ترددات الإلكترون والأيون. تردد الإلكترون لا يعتمد على كتلة الذرة أو الجزيء وأحيانا يشير إلى

تردد البلازما. وتردد الرنين إحدى الخصائص المميزة للبلازما عند الترددات العالية، ويعرف بتردد القطع الذي يمنع نقل الموجات الكهرومغناطيسية عبر البلازما.

عندما تنتشر الموجات الكهرومغناطيسية كإشعاع الرادار في البلازما الموصلة فإن الأيونات والإلكترونات ستزاح من مكانها بسبب الفارق الزمني ما بين المجال الكهربي والمغناطيسي، فالموجة تعطي طاقة للجزيء والجزيء تلقائيا سيعيد بعضًا من الطاقة المعطاة إلى تلك الموجة، ولكن باقي الطاقة سيمتص ويتحول إلى حرارة بعمليات تشبه التناثر أو تسارع الرنين، وربما تتحول إلى شكل موجة أخرى أو تأثير اعوجاجي للموجة. تستطيع البلازما أن تمتص جميع طاقة الموجة وهذا هو سر التخفي للبلازما، بمعنى أن التخفي البلازمي يمكنه تقليل المقطع العرضي الراداري للطائرة وبشكل قوي مما يجعل من الصعوبة أو ربما الاستحالة التقاطها من الرادار، ولكن مجرد التقاط الطائرة بواسطة الرادار ليس معناه أنه يحتاج إلى الدقة بالهدف لكي يرسل إليه صاروخًا أو طائرة اعتراضية. مع ذلك فإن تقليل المقطع العرضي سيقلل من مسافة الكشف الراداري مما يمكِّن الطائرة من الاقتراب من الهدف قبل اكتشاف أمرها.

مقارنة بين البلازما وحالات المادة الأخرى:

البلازما هي الحالة الرابعة للمادة، وتتميز عن غيرها من الحالات بالطاقة الهائلة التي تمتلكها. وهي ذات صفات مقاربة للحالة الغازية ولكن ليس لها شكل محدد أو كتلة. ينظر العلماء للبلازما على أنها أكثر أهمية من الغاز بسبب الحالات المميزة لها، راجع الجدول التالي:

الجدول 2: الفرق بين حالتي البلازما والغاز

الخاصية	الغاز	البلازما
توصيل كهربائي	ضعيف جدا الغازات عازل قوي إلا في حالة تحولها إلى مادة بلازمية في مجال كهربائي يفوق في قوته 30 كيلوفولت/سم.	قوي جدا لأغراض عديدة. يمكن أن يعامل التوصيل بالبلازما على أنه غير محدود.
الأنواع التي تمثلها	نوع واحد جميع الجزيئات تتصرف بطريقة مشابهة، تتأثر بالجاذبية وتتصادم مع بعضها البعض.	اثنان أو ثلاثة إلكترون أو أيون أو محايد وتتوزع حسب نوع الشحنة، وتتصرف عند أكثر الحالات باستقلالية حسب الحجم والسرعة والحرارة، وبظهور أنواع جديدة من الموجات وعدم الاستقرارية.
توزيع السرعة	نظام ماكسويل لتوزيع السرعات التصادم يتبع نظام ماكسويل لتوزيع السرعات عند جميع الجزيئات، عدا بعض الجزيئات السريعة.	غير خاضع لنظام ماكسويل تفاعلات التصادم ضعيفة عند البلازما الحارة والقوة الخارجية قادرة على تحريك البلازما من مكانها المتوازن، وتؤدي إلى كثافة قوية من الجسيمات السريعة غير العادية.
التفاعلات	مزدوج اصطدام بين جسيمين ونادرا بين ثلاثة.	تراكمي تموج، أو حركة منتظمة للبلازما، مهم جدا لأن الجسيمات تتفاعل لمجالات أبعد خلال القوى الكهربائية والمغناطيسية.

الفصل الثاني

عمليات التصادم المرنة وغير المرنة في الغازات ضعيفة التأين

مقدمة:

يعدّ سلوك الإلكترونات مع الجزيئات المحايدة في الغازات ضعيفة التأين شبيها بسلوكها في الغازات المثالية ويعطي فكرة مفيدة في سلوك البلازما الكهربية. الاصطدام المرن (في كمية الحركة التي يتم حفظها) والتصادمات غير المرنة هي الآليات التي تنقل الطاقة من الإلكترونات في المجال الكهربي إلى الجزيئات المحايدة وتشكل البلازما. معادلات القذائف الباليستية البسيطة تعطي نظرة ثاقبة نحو العمليات التي تؤدي إلى تحقيق مكاسب في مجال الطاقة. في الضغوط المنخفضة، حيث التصادمات نادرة وتكون كثافة عدد الجسيمات n منخفضة، ويمكن استخدام سلوك الجزيئات الفردية كأساس لعمليات نموذجية. في الضغوط العالية، حيث كثافة عدد الجسيمات n وتردد التصادم v كبير والفاصل بين الجسيمات صغير، يتم استبدال القيم المتوسطة إحصائيا بالسرعة الفردية.

الطاقة المكتسبة في التصادمات المرنة على طول متوسط المسار الحر λ (الفاصل بين الجسيمات) يتم نقلها بكم العمليات غير المرنة إلى الطاقة الكامنة في صورة من صور الإثارة، والتأيّن أو الانحلال والتحرر بإعادة الترابط. وأخيرًا يتم نقل الطاقة الكامنة في التصادمات غير المرنة للعملية.

قيم متوسط المسار الحر ومتوسط السرعة وتردد التصادم والقطر يتم سردها لأنواع مختلفة من الغازات عند درجة حرارة الغرفة والضغط الجوي في الجدول (1) وتكون

مفيدة كنقطة مرجعية في الظـروف الطبيعيـة المحيطـة. تحديـد القـيم المكافئـة للجسـيمات المشحونة أقل سـهولة نظـرا لأنهـا تتـأثر بالتفاعـل فـيما بينهـا وبـين المجـالات الكهربيـة الخارجية.

جدول (1) قيم متوسط المسار الحر لبعض جزيئات الغازات ومتوسط سرعتها وتردد تصادمها المحسوبة من نظرية الحركة للغازات عند درجة حرارة 288 كلفن وضغط 760 تور

Gas	Molecular	λ_g (10^{-8}m)	υ (ms^{-1})	υ_c ($10^9 s^{-1}$)	Diameter (10^{-10}m)
H_2	2.016	11.77	1740	14.8	2.74
He	4.002	18.62	1230	6.6	218
H_2O	18.000	4.18	580	13.9	4.60
Ne	20.180	13.22	550	4.2	2.59
N_2	32.000	6.79	437	6.4	3.61
O_2	32.000	6.79	437	6.4	3.61
Ar	39.940	6.66	391	5.9	3.64
CO_2	44.000	4.19	372	8.8	4.59
Kr	82.900	5.12	271	5.3	4.16
Xe	130.200	3.76	217	5.8	4.85

سرعة الانسياق (الانجراف):

سرعة انجراف الإلكترونات أعلى بكثير من الأيونات، على الرغم من أن كليهما موجود عادة بأعداد متساوية تقريبا في البلازما، حفظ توازن الشحنة والموصلية الكهربية العالية للبلازما عادة في الأصل ينشأ عن الإلكترونات.

القوة المؤثرة على الإلكترون ذات الشحنة e والكتلة m في مجال كهربائي E تكون $eE = m_e a$، حيث a هي العجلة للإلكترون. والسرعة u بعد زمن مقداره t من بدء الجسيم من السكون تكون $u = at$، والمسافة المقطوعة $ut / 2$.

سرعة الإلكترون u_d تؤسس تيار $u_d e$ ويمكن صياغة التيار بدلالة سرعة الانجراف المتوسطة للإلكترونات u_d في اتجاه المجال الكهربي، حيث إن:

$$I = u_d n_e e$$

حيث n عدد الإلكترونات.

متوسط المسار الحر هو المسافة المقطوعة بجسيم قبل الاصطدام. والقيم المحسوبة لمتوسط المسارات الحرة لجزيئات الغاز ومتوسط سرعاتها وترددات تصادمها ترد في الجدول (1). متوسط المسار الحر وتردد التصادم ومقياس تردد تصادمها إلى حد ما متقارب مع ضغط الغاز. يمكن تحديد سلوك الجسيمات المشحونة بسهولة بالحساب كما أنها تتأثر بالقرب من الجسيمات المشحونة الأخرى والمجالات الكهربية وتكون على نحو أكثر فائدة للعثور عليها بالقياس. قد تكون سرعة انجراف الإلكترونات أكثر من 10كم/ ثانية في الضغوط الأقل من حوالي 100 باسكال (0.752 ملليمتر زئبقي)، تحدث تصادمات قليلة نسبيا في هذا الضغط ومتوسط المسار الحر محكوم بفاصل القطب أو أبعاد الوعاء. عند الضغوط العالية، فإن التصادم مع الجسيمات الثقيلة يقلص المدة الزمنية للتسارع في المجال الكهربائي ويقلل سرعة الانجراف قبل الاصطدام، وفي حوالي 1 كيلو باسكال (7.52ملليمتر زئبقي) تكون السرعة الحرارية عادة أكثر 100 مرة من سرعة الانجراف.

الموصلية الكهربية Electrical conductivity:

الموصلية الكهربية يرمز لها بـ (Sm^{-1}) σ تحدد من العلاقة التالية:

$$\sigma = \frac{J}{E}$$

حيث J متجه كثافة التيار و E شدة المجال الكهربي.

مقاومة الموصل $R = \rho\, l / A$ حيث ρ المقاومة النوعية، l طول المسار و A مساحة المقطع العرضي للموصل العمودي على اتجاه سريان التيار.

الموصلية الكهربية بدلالة الكثافة العددية للإلكترونات وسرعة الانجراف تعطى بالعلاقة:

$$\sigma = en_e \frac{u_d}{E}$$

الحركية (قابلية التحرك والانتقال) Mobility:

الحركية للإلكترونات أو الأيونات تحدد من المعادلة:

$$\mu = \frac{u_d}{E}$$

الموصلية الكهربية يمكن صياغتها بدلالة الحركية للإلكترونات μ_e

$$\sigma = en_e \; \mu_e$$

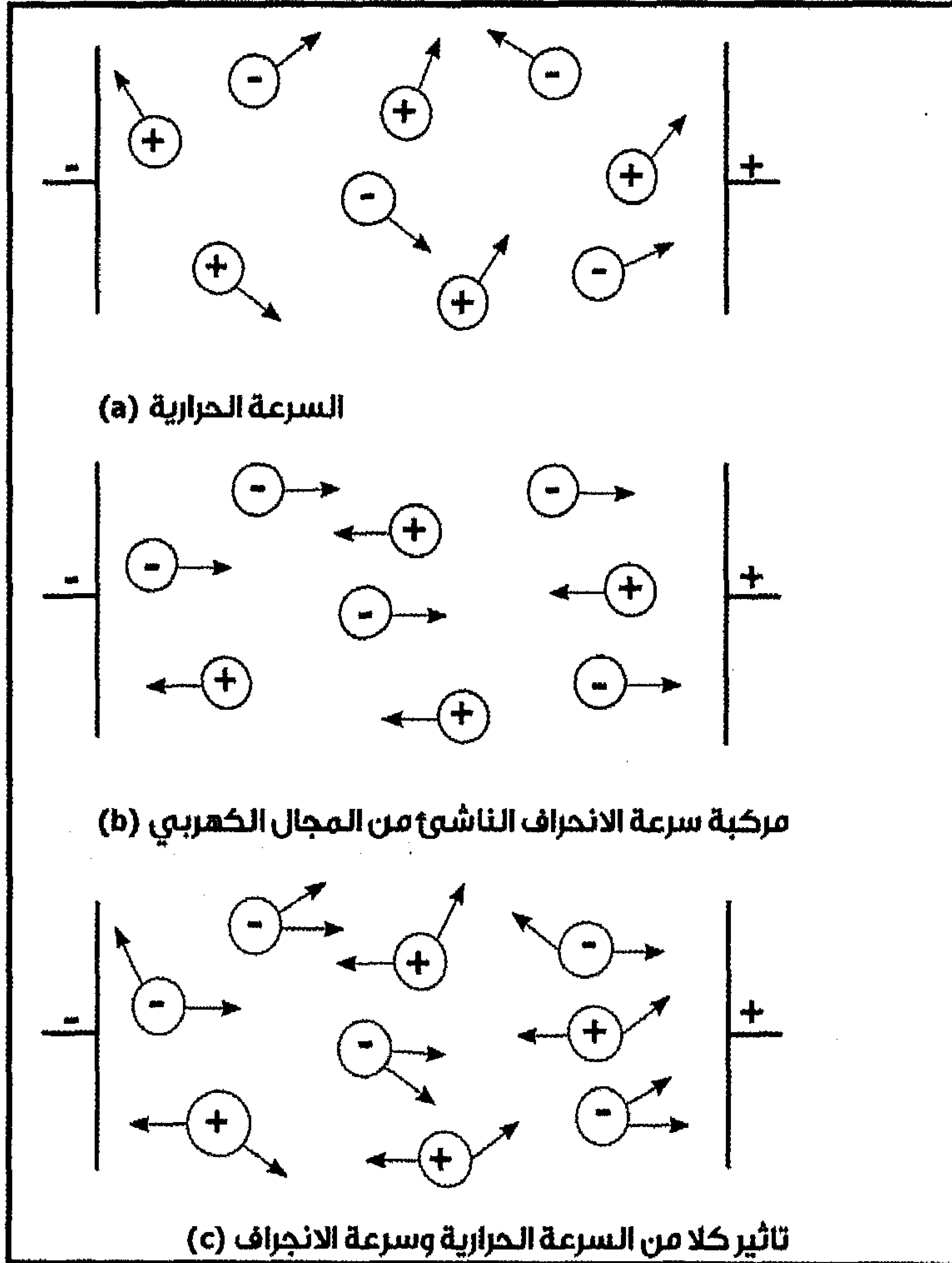
حيث $\mu_e = u_d / E \; m^2 \, V^{-1} \, S^{-1}$ مقياس التغير في سرعة الانجراف مع المجال الكهربي المسلط.

عندما يكون المجال الكهربي منخفضا والضغط أقل من 133 باسكال حيث عدد التصادمات صغير، $\mu_e \; \alpha \; E / P$، فإن الحركية تتغير تقريبا خطيا مع سرعة الانجراف للجسيم وشدة المجال الكهربي. الحركية وتردد التصادم يتغيران بمدى واسع مع مختلف الغازات وضغوطها.

السرعة الحرارية:

السرعة الحرارية للذرات والأيونات في الغازات تكون ناشئة عن الانتشار الحراري على طول التدرج في درجة الحرارة، ويمكن تحديده من معادلة الغاز وطاقة الحركة مستخدما ثابت بولتزمان. السرعة الحرارية للإلكترونات أكبر من نظيرتها للأيونات والجسيمات المحايدة نظرا لصغر كتلتها مقارنة بالأيونات والجسيمات المحايدة. التصادمات بين الجسيمات نتيجة الحركة العشوائية موضح بالشكل (1). السرعة الحرارية u_r للغازات عند الضغط الجوي و درجة حرارة مقدارها 20 درجة سيلزيوس حوالي

5 كم/ ثانية، والتصادمات مع الذرات والجزيئات تقلل سرعة الانجراف وتسبب مقاومة نوعية كهربية عالية ($>10^9\ \Omega m$) قبل الانهيار الكهربي. عند الضغوط المنخفضة، سرعة الانجراف في المجال الكهربي أعلى بكثير من سرعة الانتشار. بعد انهيار المقاومة الكهربية للتيار المستمر للبلازما في حدود $10^{-9}\ \Omega m^{-1}$ مقارنة بالمقاومة الكهربية للمعادن.



شكل (1): حركة الجسيمات المشحونة (a) السرعة الحرارية (b) مركبة سرعة الانجراف الناجمة عن المجال الكهربي (c) تأثير مؤتلف للسرعة الحرارية وسرعة الانجراف.

تردد التصادم:

تردد التصادم والمقطع العرضي للتصادم هما بارامتران ذوا أهمية في تحديد كثافة الطاقة في البلازما. وتردد التصادم يكون تحليله صعبًا إلا عند الضغوط المنخفضة جدا. عند ضغوط الغازات العالية حيث تردد التصادم عالٍ، النتائج المحددة تجريبيا للمقطع العرضي للتصادم تكون مناسبة لنطاق واسع من الظروف. ترددات التصادم بين الإلكترونات والذرات عادة تكون عالية وتحسب لكثافات الطاقة العالية التي تم الحصول عليها في البلازما. على سبيل المثال، تردد التصادم للإلكترون مع جسيم محايد في النيون عند ضغط 133 باسكال حوالي $3\times10^{8}\ s^{-1}$.

إذًا التصادم مع الجسيمات المحايدة هو عملية انتقال الطاقة الأساسية، سرعة الانجراف تحكم بالمتوسط الزمني بين التصادمات. إذا تصادم الإلكترون بعد زمن τ_{ce} السرعة النهائية:

$$u_d = \frac{eE}{m_e}\tau_{ce}$$

والزمن بين التصادمات $\tau_{ce} = \lambda_{ce} / u_d$ حيث u_d متوسط السرعة.

الحركية يمكن صياغتها بدلالة تردد التصادم ν_{ce} بما إن $u_d = ft$ و

$$\mu_e = \frac{e}{m_e \nu_{ce}}$$

الموصلية الكهربية تعطى بالمعادلة:

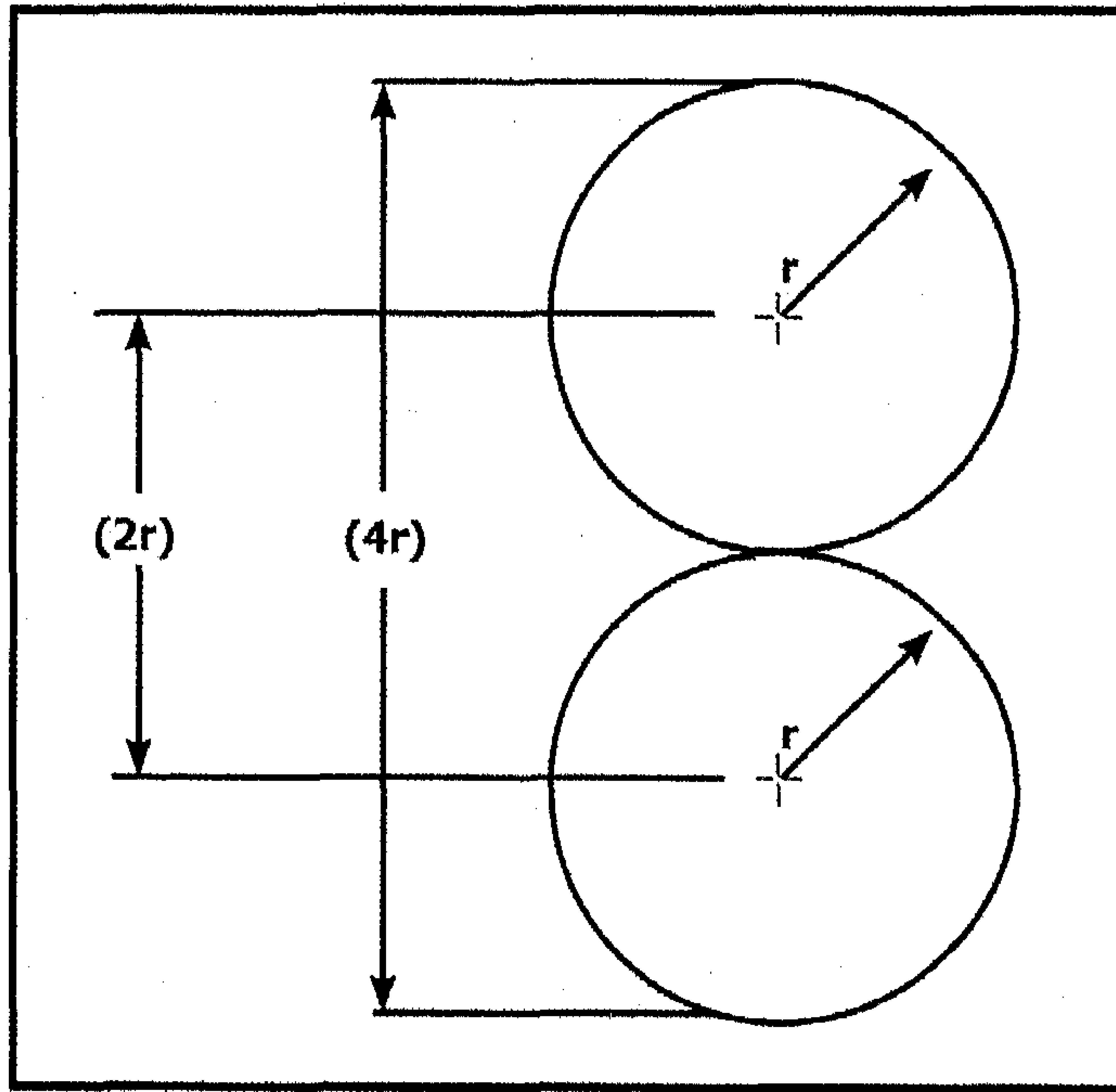
$$\sigma = n_e e \left(\frac{e}{m_e \nu_{ce}}\right)$$

والموصلية الكهربية تحدد بهذه الطريقة تكون نافعة في وصف البلازما DC (ذات التيار المستمر). إذا كان تردد إمداد الطاقة (متناوب) أقل بكثير من تردد التصادم عندئذ يكون

السلوك مماثلا لبلازما DC لكن إذا كـان الـتردد أكـبر مـن تـردد التصـادم عندئـذ يكـون السلوك أكثر تعقيدا.

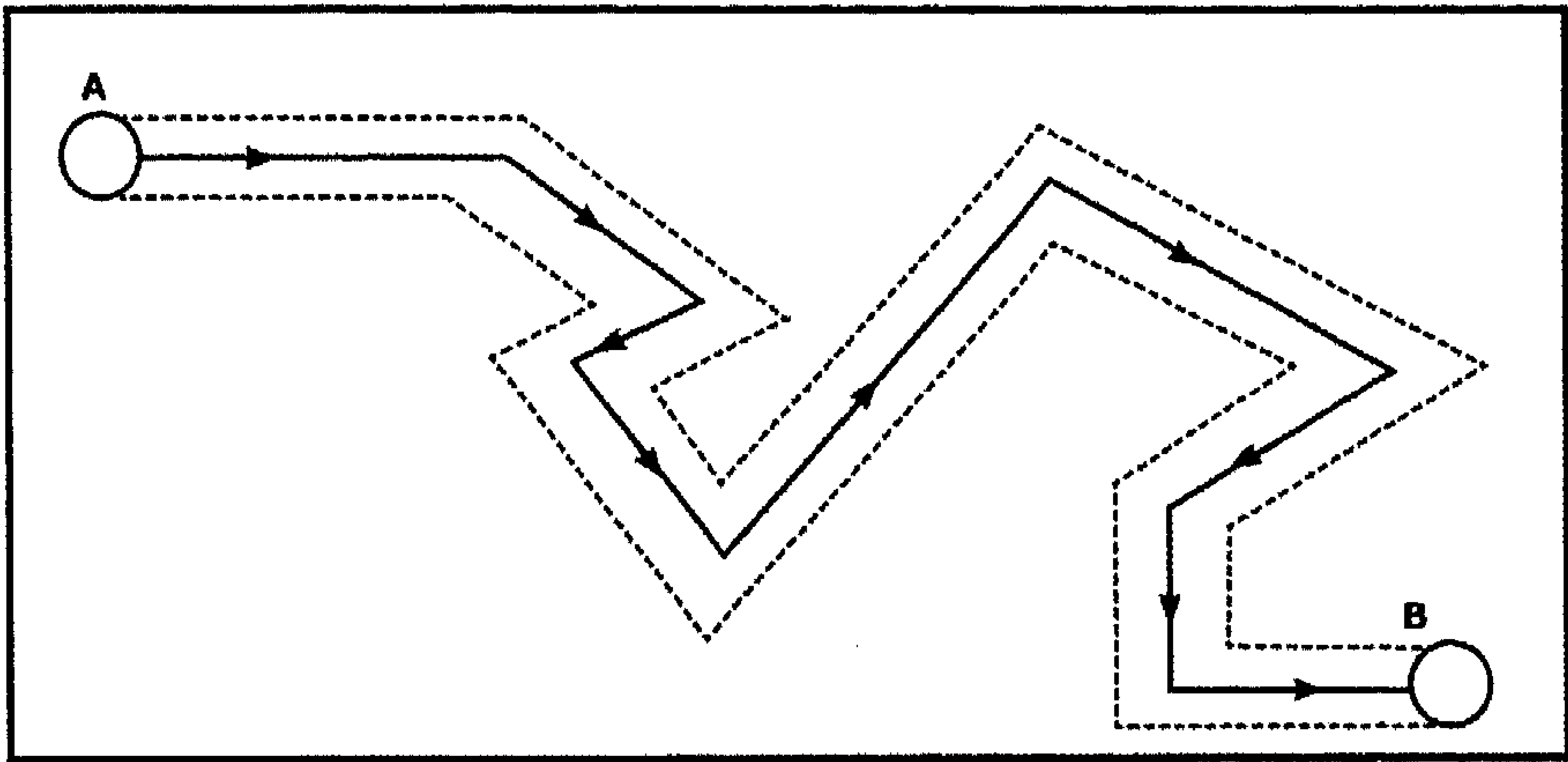
المقطع العرضي للتصادم:

المقطع العرضي σ_c للجسيم المتصادم هو المساحة الفعالة لذلك الجسيم الذي يمكن أن يحدث تصادما بين جسيمين اثنين. إذا كان أحد الجسيمات المتصادمة هو إلكترون، بنصف قطر فعال أصغر بكثير من أي ذرة أو جزيء، عندئذ المقطع العرضي للتصادم هو المقطع العرضي للذرة أو الجزيء الذي يشارك في التصادم مع الإلكترون، أي، $\sigma_c = \pi r^2$. المقطع العرضي لجسيمين اثنين ذوي أنصاف أقطار r_1 و r_2 يصبح $\pi (r_1 + r_2)^2$ وعندما يتساوى أنصاف أقطار كل من الجسيمين يصبح المقطع العرضي للتصادم $\sigma = 4\pi r^2$ (الشكل 2).



شكل (2): المقطع العرضي لتصادم الجسيمات متساوية الحجم

يصطدم الجسيم عدة مرات خلال المسار المقطوع حسب عدد الجسيمات الأخرى الواردة ضمن وحدة الحجم الأسطواني في التجول العشوائي. يمكن تحديد عدد التصادمات بالجسيم المتحرك بسرعة u باستخدام المقطع العرضي للتصادم؛ لأن الجسيم المتحرك بسرعة u للزمن t المكتسح من وحدة الحجم الاسطواني V_{vol} مساوية $\sigma_c ut$ (شكل 3). إذا كانت الكثافة العددية للغاز n_g، عندئذ عدد الجسيمات داخل وحدة الحجم الأسطواني هو $n_c ut \pi r^2$، وبناء على ذلك عدد التصادمات يعطى بـ $n_c \sigma_c ut$.



شكل (3): مسار تصادم الجسيم الداخل في مجال الجسيمات بطيئة الحركة

متوسط المسار الحر هو المسافة الكلية المقطوعة في وحدة الزمن مقسوم على عدد التصادمات:

$$\lambda = \frac{ut}{n_c \sigma ut} = \frac{1}{n_c \sigma_c}$$

الزمن بين التصادمات هو السرعة مقسومة على متوسط المسار الحر، وبالتالي تردد التصادم ν:

$$\nu = \frac{u}{\lambda} = n_c \sigma_c u$$

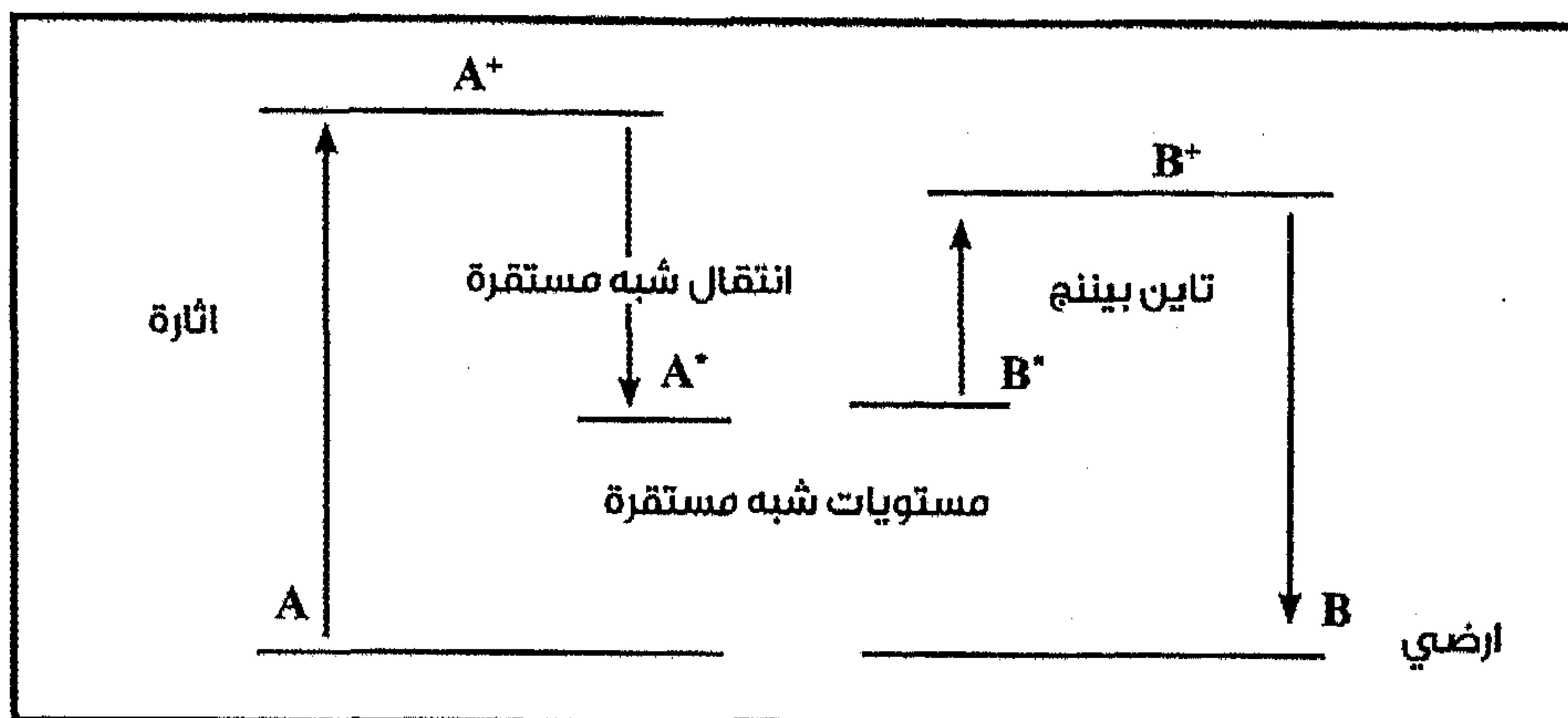
يتأثر متوسط المسار الحر للإلكترون بالتفاعل مع سائر الجسيمات المشحونة وأيضا بتأثير التصادمات (تفاعل كولوم). القوى الكهرومغناطيسية بين الإلكترونات والأيونات مرتفعة بالمقارنة مع القوى المرتبطة بإجراء تغيير في الزخم (كمية الحركة). الإلكترونات يمكن أن تقترن بالأيونات البطيئة، ويحدث انحراف أو تباطؤ بالأيونات أو نفوذ الأيونات (انتشار مثنوي القطبية) داخل طول ديباي، فيما عدا عند ضغط منخفض حيث المسافات الفاصلة بينها قد تكون كبيرة. قد تكون سرعة الانجراف للإلكترونات والأيونات أكبر بكثير من السرعة الحرارية عند الضغوط المنخفضة حيث تحدث تصادمات قليلة، والعلاقات البسيطة الملائمة للجسيمات الثقيلة والمناطق الخالية من المجال تكون غير دقيقة. المقاطع العرضية للتصادمات ستبقى لمختلف الغازات، وأنواع التصادم وطاقة الإلكترونات وتفاعلات كولوم ومتوسط المسارات الحرة لدى الإلكترونات والأيونات غالبًا ما تحدد تجريبيا.

عمليات الاصطدام غير المرنة:

عمليات الاصطدام غير المرنة مثل الإثارة والتأيـّن ناشئة عن التغير في الطاقة بين مستويات الطاقة للذرة أو الجزيء (الشكل 4). الانحلال، بتقسيم الجزيء وطاقة التخزين الكامنة، أيضا هي عملية غير مرنة. معادلات القذائف البالستية الملائمة للتصادمات المرنة لا تنطبق على العمليات غير المرنة التي تنقل كمًّا من الطاقة. (لا يزال ممكنًا أن تستخدم معادلات القذائف البالستية لكل من الإلكترونات والأيونات المتضمنة في العمليات المرنة). اعتمادًا على الطاقة الحركية للإلكترون على الارتطام مع جسيم محايد، قد تثار الذرة أو تتأين، وقد ينحل الجزيء في حالة تذبذب أو تأين.

الطاقة لها علاقة بالطول الموجي $E = hf$، حيث E كمية الطاقة (eV)، h هو ثابت بلانك (6.626×10^{-34} Js) وسرعة الضوء $c_0= f\lambda$ حيث f التردد و λ الطول الموجي. أنصاف أقطار المدارات المختلفة تتناسب مع مربع الأعداد الصحيحة المقابلة للعدد المدار. الحد الأدنى من الطاقة يتوافق مع المدار الأبعد، الذي عندما يتم تعبئة هذا يعرف باسم

المستوى الأرضي. تكتسب الإلكترونات الطاقة بالتصادم وينتقل إلى مدار آخر وتكون مثارة أو الإلكترونات حرة ويتأين الجسيم. الطاقة اللازمة لتحرير إلكترون من المستوى الأبعد تعرف بجهد التأين الأول.



شكل (4): رسم توضيحي لمستويات الطاقة المصاحبة بانتقالات الإثارة وشبه المستقرة والبيننج

الطاقة المنقولة لكل مرحلة انتقالية لذرة أو جزيء صغيرة جدًّا ويتم حسابها بوحدة إلكترون فولت (eV). توزيع الطاقة كدالة في الطول الموجي والانتقال الذري يرد في الجدول (2).

جدول (2) عمليات إشعاعية وخصائص طاقتها وترددها وأطوالها الموجية

Frequency band	Wavelength rang (m)	Frequency (Hz)	Energy (ev)	Type of process
Near-infrared	10^{-6}	3×10^{14}	1.2	Vibrational and electronic excitation
Visible light	5×10^{-7}	0.6×10^{15}	2.4	Bond breaking

Near-ultraviolet	3×10^{-7}	1×10^{15}	4.1	Outer shell electron liberation
Far-ultraviolet	1.5×10^{-7}	2×10^{15}	8.3	Middle shell electron liberation
Long X-ray	3×10^{-8}	1×10^{16}	3×10^{14}	Inner electron
Short X-ray	10^{-8}	3×10^{16}	3×10^{14}	Liberation
Gamma-ray	10^{-12}	3×10^{20}	3×10^{14}	Nuclear processes

الإثارة هي عادة انتقال إلكترون من مدار الذرة أو الجزيء إلى المدار الخارجي (يتطلب أقل طاقة) بالتصادم مع إلكترون حر. تحرر إلكترون يتطلب طاقة أعلى من حوالي 0.01eV. تحدث انتقالات الإثارة لتصل إلى وضع مستويات الطاقة لحوالي 10eV، عندما تأخذ الإثارة مكانها ولها فترة عمر حوالي 10^{-9}sec. فقط يمكن أن تحدث إثارة للذرة من عملية انتقال إلكترون، كما قد يتعين تنشيط الجزيئات بالانتقالات التذبذبية والدورانية. يتم كتابة عملية الإثارة الإلكترونية لذرة ما:

$$E + A \rightarrow A^{*} + e$$

$$A^{*} \rightarrow A + hf$$

كما يرافق إعادة الترابط انبعاث للطاقة، غالبًا كضوء بطول موجي يناظر طاقة الإثارة. العملية للجزيء تكون أكثر تعقيدًا لأن هناك انتقالات مدارية أكثر وإمكانية انبعاث أطوال موجية عديدة.

طاقة إلكترون في البلازما الباردة تكون منخفضة نسبيا بالمقارنة مع جهد التأين، وفقط إلكترونات قليلة نسبيا في ذيل توزيع الطاقة لها طاقة تكفي للتسبب في التأين. الإثارة تعمل كمخزن قصير الأجل للطاقة مع استمرار انتقال الطاقة سريعًا للغاية بين الجسيمات المثارة دون فقد على الوسط المحيط بها. بهذه الطريقة، يمكن تضخيم الطاقة المنخفضة من

اصطدام الإلكترون بالعديد من التصادمات وتخزينها خلال فترة زمنية قصيرة حيث تأثير التصادمات يضاف إلى المستوى الذي يمكن أن يحدث التأين.

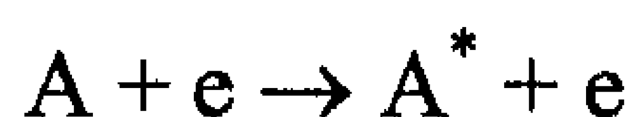
العمليات شبه المستقرة:

الانتقال إلى المستوى الأرضي غير مسموح به في بعض الذرات والجزيئات مثل الغازات الخاملة والزئبق، التي لديها مستويات طاقة شبه مستقرة. الغازات الخاملة لها مستويات شبه مستقرة في نطاق 20 eV – 10 (الجدول 3).

جدول (3): الطاقات شبه المستقرة للغازات النادرة

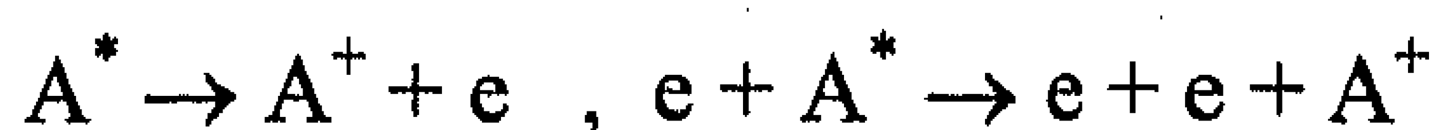
Gas	Metastable energy (eV)
He	19.8
Ne	16.6
Ar	11.5
Kr	9.9
Xe	8.32

انتقالات الإثارة للمستويات شبه المستقرة لها فترات زمنية تصل إلى 10×10^{-3}sec.
الذرة شبه المستقرة قد تتصادم مع المستوى الأرضي لذرة أخرى غير مثارة تسبب لها إثارة:



$$A + e \rightarrow A^* + e$$

نظرا لعدم تحرر إلكترون تكون هذه العملية رنينية (رنانة) وتنخفض طاقة التأين بمقدار $V_i - V^*$ التصادم أكثر مع إلكترون سوف يزيد من طاقة الذرة، وقد يسبب تأينًا بالخطوات الموضحة بالمعادلة:

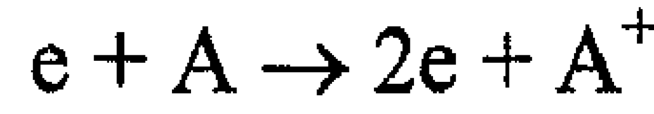


$$A^* \rightarrow A^+ + e \quad , \quad e + A^* \rightarrow e + e + A^+$$

المستوى شبه المستقر له تأثير على زيادة المقطع العرضي للتصادم، ويمكن الحصول على مستويات طاقة أعلى من إثارة التصادمات الأولية والتصادمات المتتابعة التي قد تكفي لتأين الغاز.

عمليات التأين وإعادة الترابط:

عندما تتعدى طاقة حركة إلكترون في التصادم مع ذرة أو جزيء طاقة التأين للذرة أو للجزيء قد تحدث إثارة أو تأين وينتج أيون موجب واثنان من الإلكترونات البطيئة:



$$e + A \rightarrow 2e + A^{+}$$

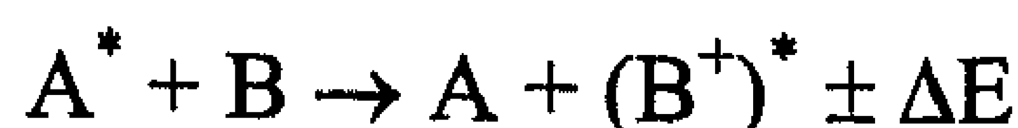
والإلكترون الجديد بدوره ينتج إلكترونا آخر بالتصادم كلما اكتسب طاقة في المجال الكهربي في عملية تضعيف وتؤدي إلى إشعال البلازما. عموما يحدث التأين عند مستويات طاقة أعلى من مستويات الإثارة وتناظر ترددات أكبر من 2×10^{14}Hz (انظر جدول 4). طاقة التأين تتزايد مع مسافة الإلكترون من النواة نظرًا لتأثير التدريج الداخلي shielding وتقليص المسافة من النواة. القيم النموذجية لطاقات التأين المقابلة للمستويين الأول والثاني لعمليات التأين التي تعترض التفريغات الكهربائية تكون عادة بين 10 – 30eV. الجدول يعطي أمثلة لبعض عمليات التأين.

جدول (4): بعض عمليات التأين

$e + A \rightarrow A^{+} + 2e$	Ionization by electron-atom collision (> 10 eV)
$e + A^{*} \rightarrow 2e + A^{+}$	Electron metastable ionization (eV)
$e + AB \rightarrow AB^{-}$	Ionization by electron attachment
$A^{*} + B \rightarrow A + e + B^{+}$	Metastable neutral ionization collision (Penning ionization)
$A^{+} + B \rightarrow A + B^{+}$	Charge exchange
$A^{+} + B \rightarrow A^{+} + B^{+} + e$	Ionization

انتقال الشحنة:

الشحنة يمكن أن تأخذ مكانها في التصادم بين الذرة والأيون. الذرة المحايدة تتأين وتثير المستوى الأعلى للأيون المكون بالتصادم مع الذرة:



$$A^* + B \rightarrow A + (B^+)^* \pm \Delta E$$

الانحلال (الانفصال):

انحلال الغازات عموما يحدث من حوالي 1000كلفن ليصل إلى حوالي 4000 كلفن، الذي يكون عنده الانحلال تامًا. طاقات الانحلال لرابطة نموذجية عادة ما تكون بين حوالي 3 الى7 إلكترون فولت، بل يمكن أن تكون مرتفعة في حالة النتروجين لتصل إلى 9.8 إلكترون فولت وهي كافية للإثارة أو التأين. التأين الانفصالي يمكن أن يحدث أيضا بتشكيل زوج أيون:



$$e + A_2 \rightarrow A^+ + A^- + e \quad \text{and} \quad e + AB \rightarrow A^+ + B^- + e$$

التأين السالب:

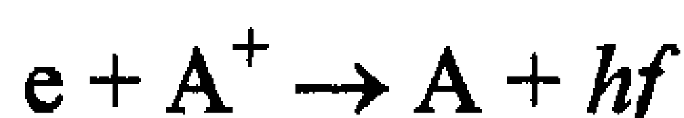
الأيونات السالبة يمكن أن تتكون بمرافقة الانفصالية وتشكل أيونات سالبة مع عظم المقطع العرضي للتصادم عند الطاقات المنخفضة ($<1eV$) في الغازات الكهروسلبي مثل الهالوجين والأوكسجين:



$$e + AB \rightarrow A + B^-$$

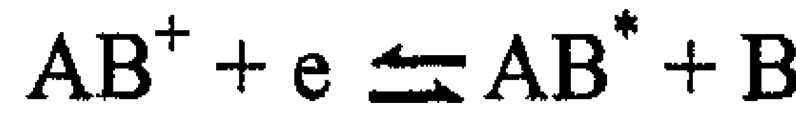
إعادة الترابط:

إعادة الترابط هي العملية التي بها تفقد البلازما الطاقة الكامنة التي اكتسبتها بإعادة ترابط الإلكترونات والأيونات في عملية إعادة الترابط الإشعاعي:

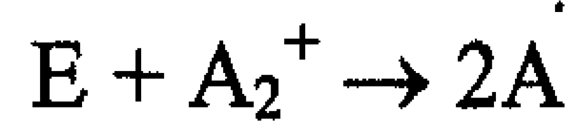


$$e + A^+ \rightarrow A + hf$$

أو بإعادة الترابط الانحلالي:



$$AB^+ + e \rightleftarrows AB^* + B$$



$$E + A_2^+ \rightarrow 2A^{\cdot}$$

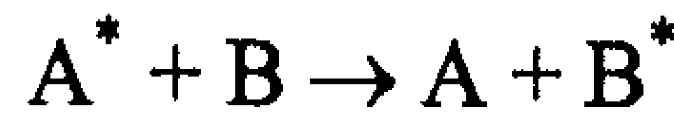
التأين شبه المستقر:

تأثير المستويات شبه المستقرة أو تأين بينينج Penning عن عدد التصادمات يزيد من احتمال الانتقال وله تأثير مشابه لزيادة المقطع العرضي للتصادم، الذي يكون وسيلة مفيدة لوصف العمليات. فترة العمر الطويلة من الإثارة شبه المستقرة تساعد على تراكم التأين بالتصادمات المتلاحقة ولكن ليس عادة عملية التأين الرئيسية. الانتقالات تعتمد على ضغط الغاز والغاز والبخار والشوائب التي قد يكون لها أثر كبير على الانتقالات بتوفير مستويات الطاقة المتوسطة وشبه المستقرة، والتي تستخدم للتقدم في المصابيح وأجهزة الليزر. التأين شبه مستقر يمكن من تبادل الطاقة غير الرنانة أن تأخذ مكانها بانتقال الشحنة في خليط الغازات. أوتأين Penning يحدث عندما تصطدم ذرة محايدة مثارة وتؤين ذرة محايدة أخرى:



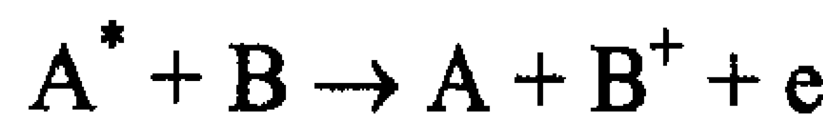
$$A^* + B \rightarrow A + B^+ + e \text{ or dissociation or } A^* + B_2 \rightarrow A + 2B$$

يمكن إضافة الغازات الخاملة مثل: الهليوم والنيون لغاز آخر لاستخدام تأثير بينينج لتعزيز عمليات الإثارة أو التأين:



$$A^* + B \rightarrow A + B^*$$

أو غالبا تأين:



$$A^* + B \rightarrow A + B^+ + e$$

جهد التأين لغاز هو مقياس للطاقة اللازمة لتأين الغاز والطاقة الكامنة المتوفرة في عملية البلازما. ويبين (الجدول 5) جهد التأين، وطاقة الإثارة المنخفضة وطاقة الانحلال لعدد من الغازات.

جدول (5): خصائص الطاقات لبعض الذرات والجزيئات

Atom or molecule	Lonization potential (eV)	Electron affinity (eV)	Metastable energy level (eV)	Lowest excitation energy (eV)	Dissociati on energy (eV)
H	13.6	0.75	-	10.2	-
He	24.6	-	19.8	21.2	-
O	13.6	1.5	1.97	9.2	-
F	17.4	3.5	-	12.7	-
Cl	13.0	3.6	-	8.9	-
H_2	15.6	-	-	11.5	4.5
O_2	12.5	0.45	1.2	7.9	5.1
Cl_2	13.2	2.5	-	-	2.5
C_6H_6	9.6	-	-	-	-

الفصل الثالث

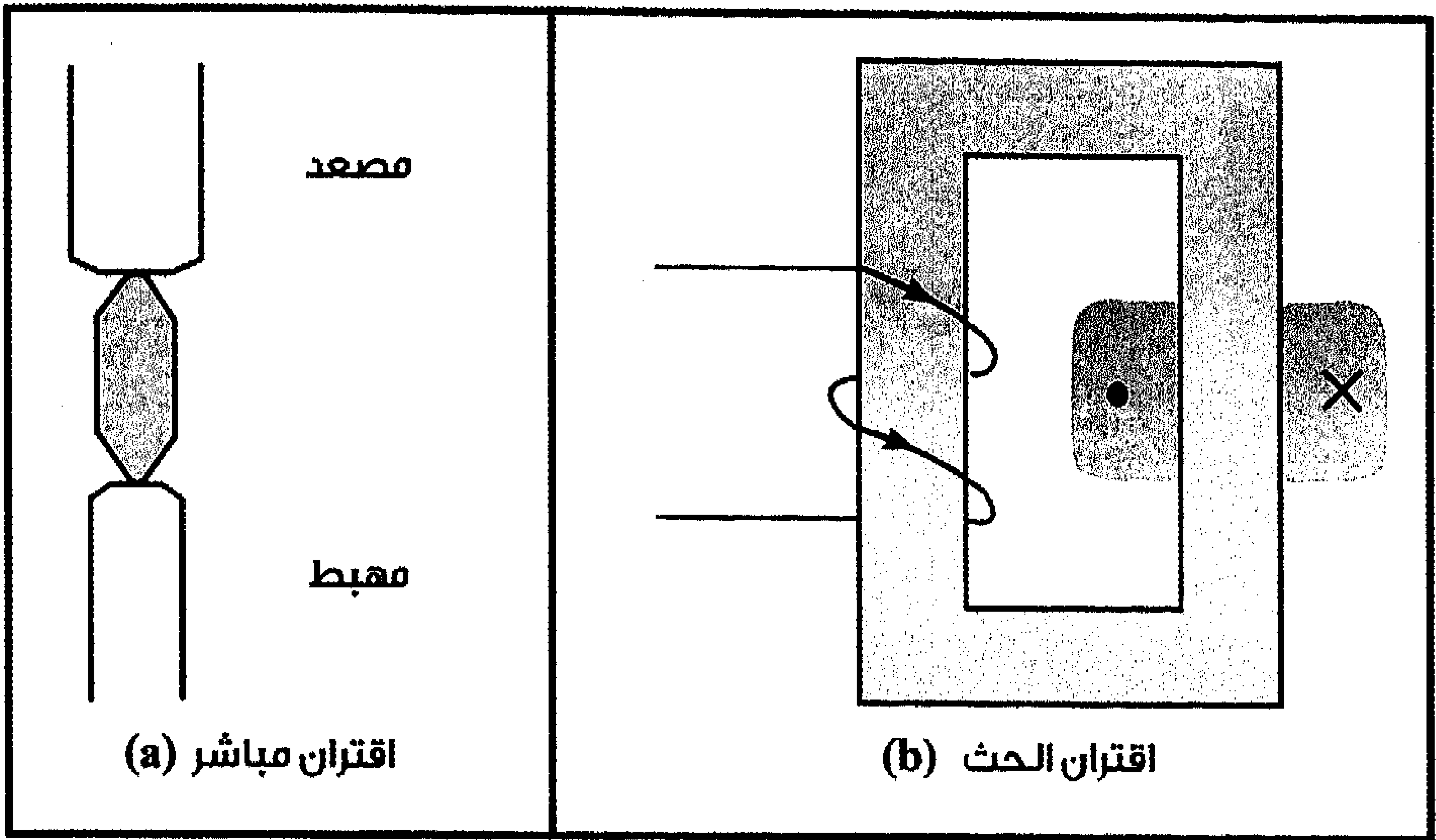
عمليات الاقتران (Coupling Processes)

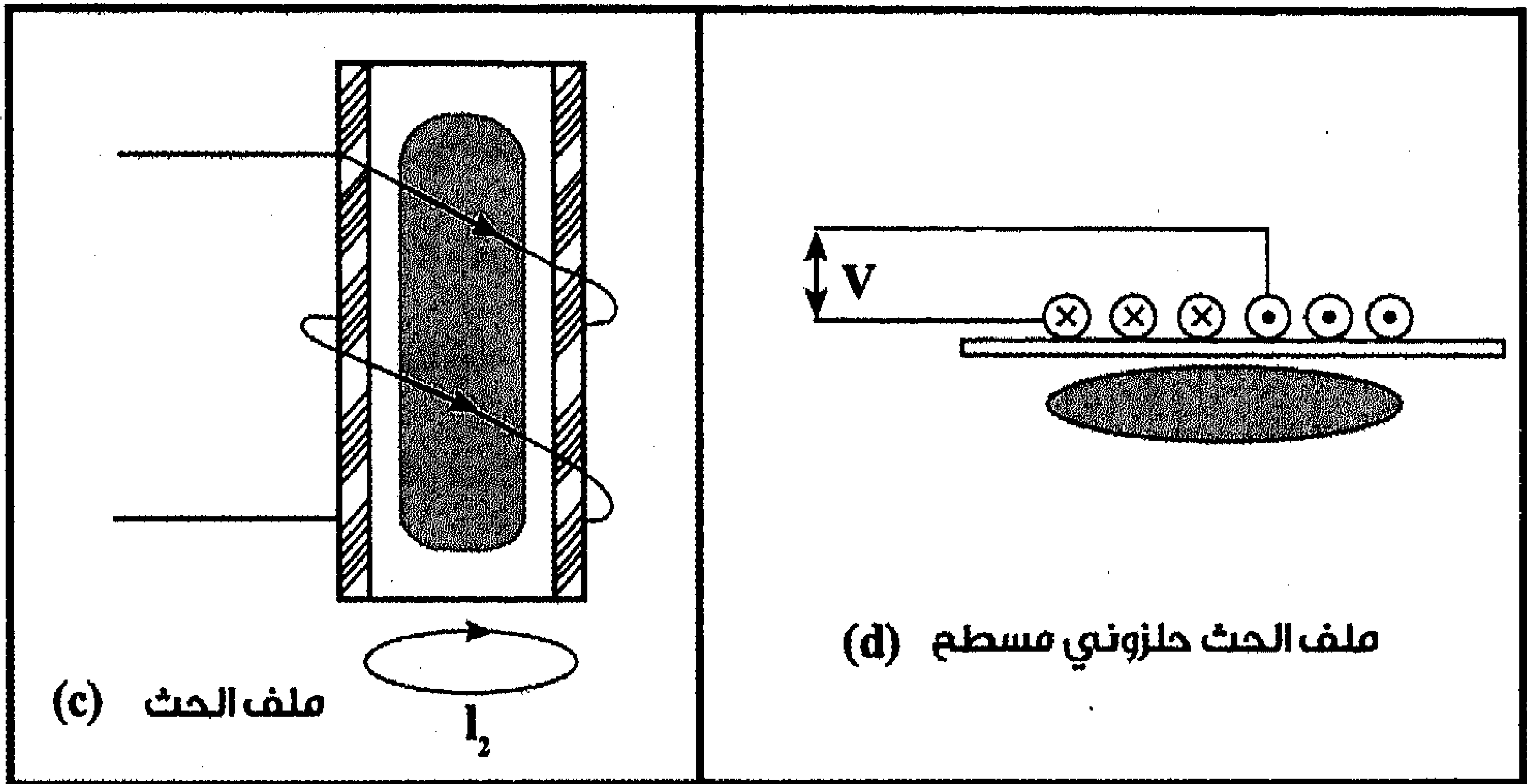
مقدمة:

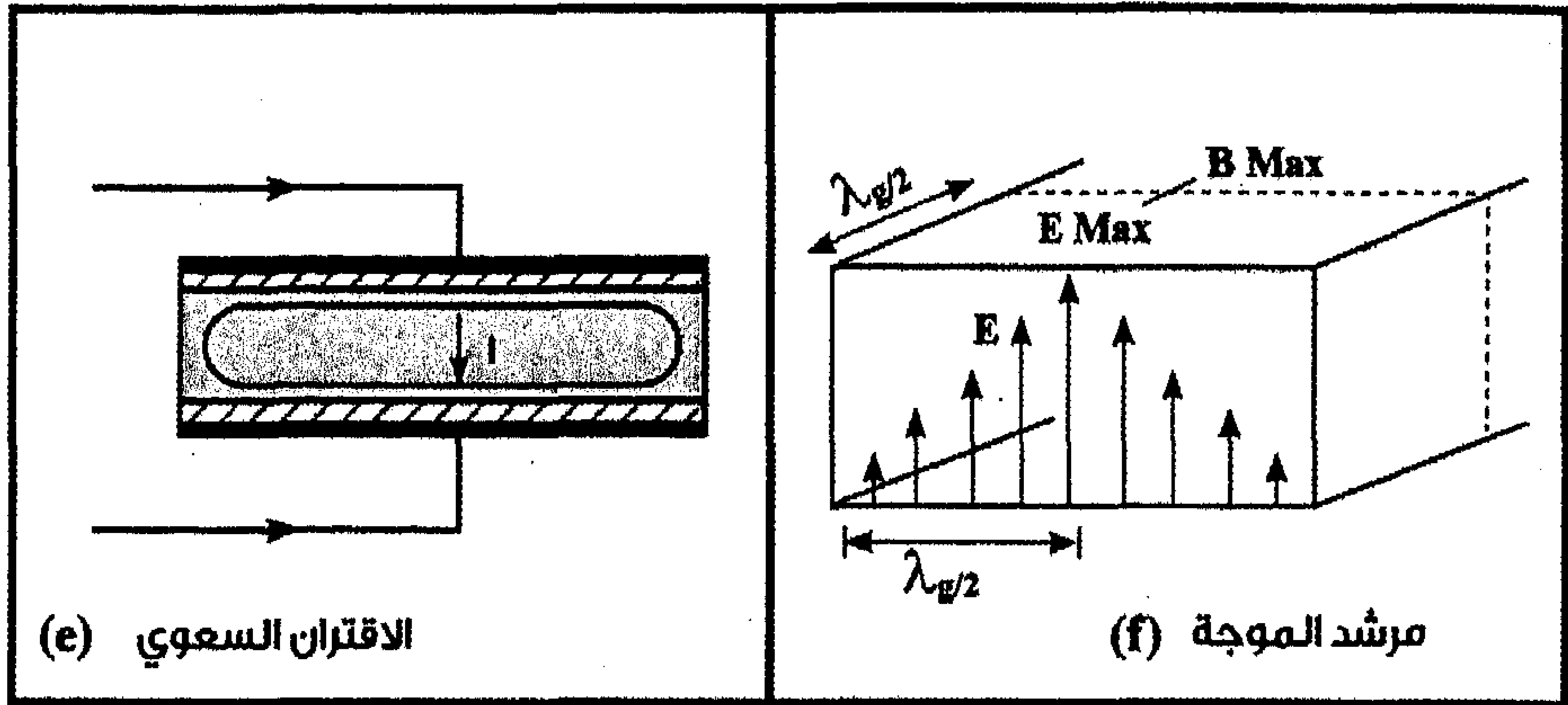
اقتران الطاقة بالبلازما عادة يتحقق بنقل الطاقة من المجال الكهربائي إلى الإلكترونات، التي بدورها تنقل هذه الطاقة إلى الذرات والأيونات الأخرى من خلال العمليات التصادمية المرنة وغير المرنة، بالإضافة إلى العمليات عديمة التصادم. الحقل المغناطيسي الموجود يطابق تدفق سريان الشحنة، والمجالات المغناطيسية الخارجية قد تستخدم أيضا للمساعدة في نقل الطاقة. على مدى العقود القليلة الماضية تطورت أشباه الموصلات ذات التردد والطاقة العالية بخطوات هائلة مما جعلها تستخدم كمصادر طاقة ذات تردد عال ملائمة للبلازما. وفتحت العديد من التطبيقات الجديدة لأنظمة البلازما.

طرق اقتران الطاقة بالبلازما:

العديد من طرق اقتران الطاقة بالبلازما موضحة بالرسم التخطيطي في الشكل (1): الأقطاب في حالة تلامس مع البلازما [اقتران مباشر] أو بدون أقطاب [اقتران غير مباشر بالحث (b) (c) (d)، أو سعوي (e) أو باستخدام الموجات الدقيقة (f)]. طاقة البلازما وكثافة الطاقة تتحدد بالتطبيق. لا يمكن اعتبار عملية الاقتران مستقلة عن البلازما، وعوامل مثل حجم البلازما وهندسة وتصميم المفاعل تؤثر فيها. متطلبات الاقتران يمكن حلها بشروط عادة من حيث الطاقة وكثافة الطاقة لهذه العملية.


مصعد
مهبط
اقتران مباشر (a)
اقتران الحث (b)


V
ملف الحث (c)
I_2
ملف الحث حلزوني مسطح (d)



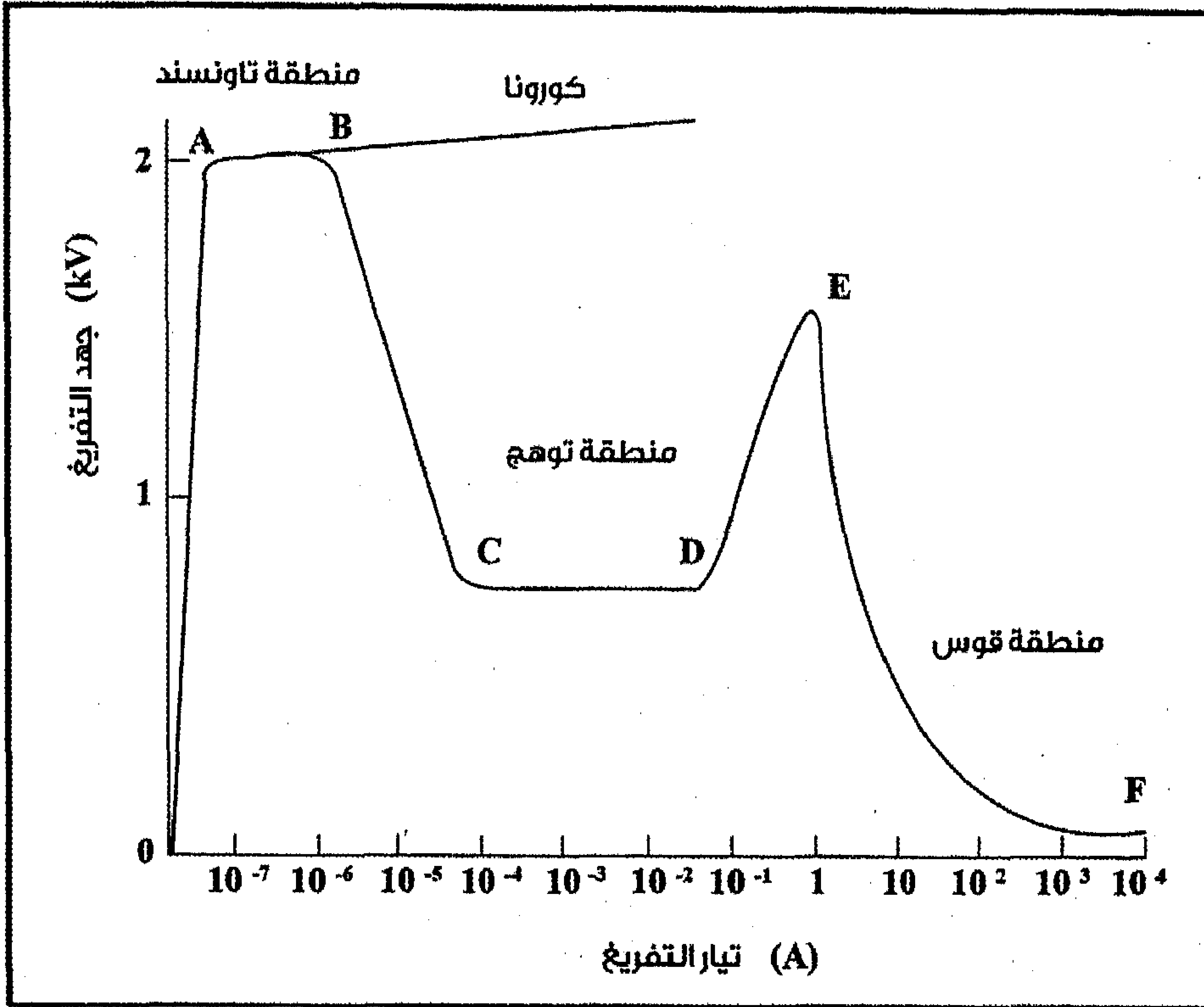
شكل (1): طرق اقتران الطاقة الكهربية للبلازما

الاقتران المباشر:

الاقتران المباشر للتفريغ الكهربي هو من الطرق الأولية التي تم استخدامها والتي ما زالت الأسلوب الأكثر استخدامًا اليوم. العملية يهيمن عليها استخدام الأقطاب بالإضافة إلى القيود الأخرى المشتركة بين جميع أنظمة البلازما. تستخدم الأقطاب على نطاق واسع مع التيار المستمرDC وأيضا مع التيار المتردد AC عند الترددات العالية.

الاقتران المباشر بطبيعته بسيط ومرن، ونسبيا رخيص ولديه الإمكانيات للاستخدام الفعلي لنطاق كامل لتشغيل أنظمة البلازما، ولكن هذه الطريقة مقيدة بهندسة الأقطاب والتلوث الناجم عن الأقطاب. بعض المنشورات الأصيلة في الخمسينيات ما زالت توفر مقدمة مفيدة لهذا الموضوع، وهناك كمية هائلة من النتائج التجريبية لقياسات خصائص التفريغ الوهاجي والقوس، بعضها تم الحصول عليه منذ أكثر من 50 عامًا وما زالت تستخدم اليوم.

خصائص منحنى التفريغ الكهربي (العلاقة بين الجهد والتيار مبينة بالشكل 2) تستخدم على نطاق واسع لوصف المناطق الرئيسية بلغة المتغيرات القابلة للقياس لكل من الجهد والتيار، وعلاقتها بظهور التفريغ، ولكنها لا تشمل تأثيرات كثافة التيار، وضغط الغاز أو التردد.



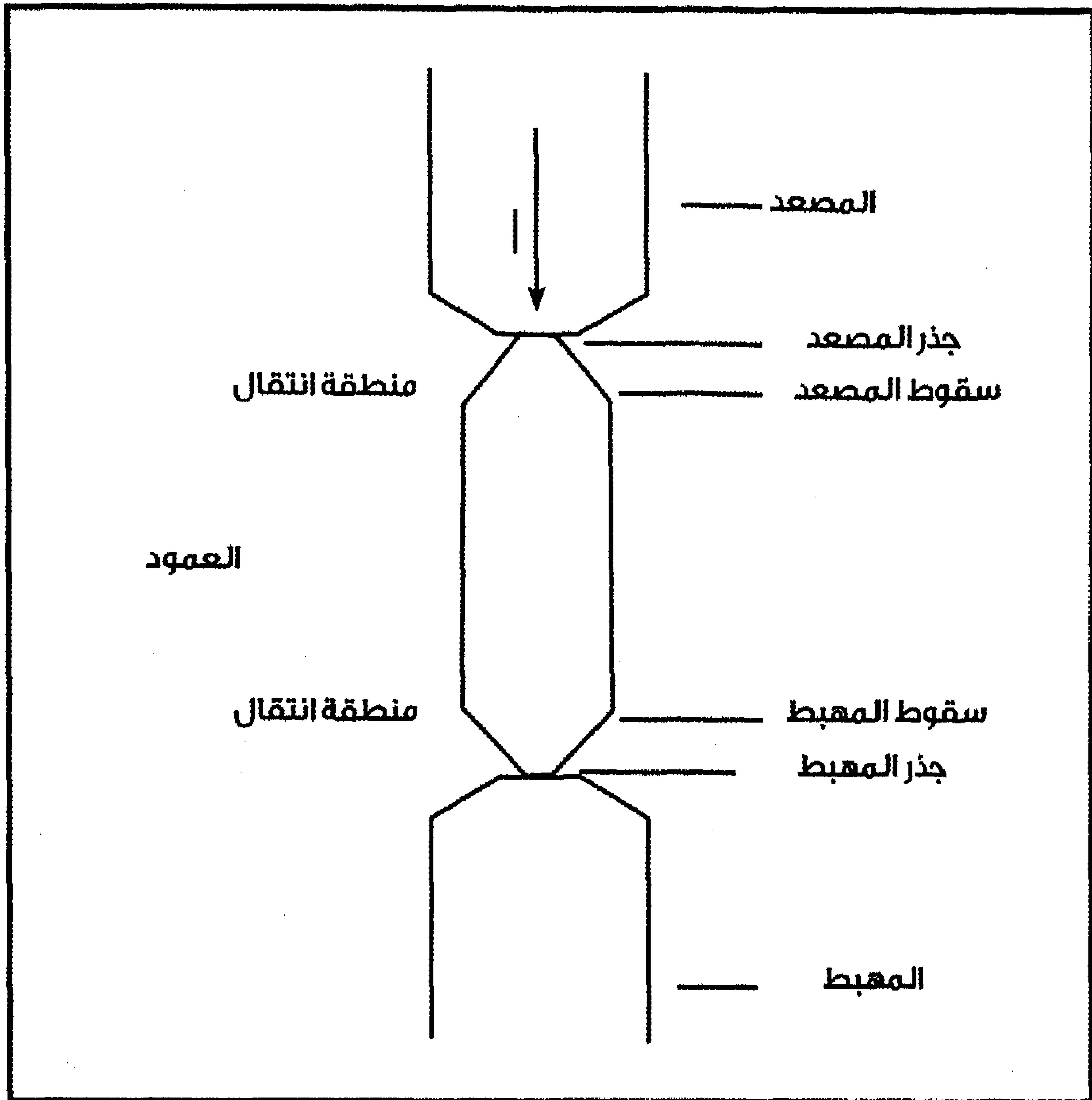
شكل (2): خصائص التفريغ العامة

ملامح التفريغ تعطي تمثيلا واضحا لكيفية تغيير سلوك البلازما عبر طائفة واسعة من التيار، ولكن على الرغم من استخدامه على نطاق واسع لوصف عمليات التفريغ الكهربي والبلازما، فإنه لا يتوافق مع ميثاق المتغير المستقل (الجهد في هذه الحالة) على المحورx، والمتغير التابع (التيار) على المحور y. عندما يسلط الجهد بين الأقطاب، تتسارع الإلكترونات بين الأقطاب (الناتجة من التأين الضوئي وإشعاعات جاما) في الفجوة على طول المنطقة O–A في الشكل (2). كلما زادت قيمة الجهد تتصادم الإلكترونات المسارعة في المجال الكهربي مع الجسيمات المتعادلة، ويسري تيار صغير جدا حتى يحدث التشبع عند النقطة A وتتجمع كل الإلكترونات الحرة عند الأنود. عند وصول منطقة تاونسند

يحدث تضعيف للشحنة. إذا ما تم تجاهل الفقد عندئذ يصبح التيار I Townsend (A-B) $= e^{\alpha d}$، حيث α هو معامل تاونسند الأول وd المسافة بين الأقطاب. إذا كان معامل الفقد المقابل للتصادمات غير المؤينة هو عندما يتحقق الشرط ($e^{(\alpha-\gamma)} > 1$) عندئذ معدل إنتاج الإلكترونات يتجاوز المفقودات، ويزداد التيار على طول المنطقة دون السوية subnormal B–C في التفريغ المتوهج. على طول هذه المنطقة، تنخفض كثافة التيار عند الكاثود وينتشر التفريغ. منطقة التوهج B–E هي تفريغ بارد وغير متوازن تحت الضغط الجوي. على الجانب الآخر منطقة الوهج العادي C–D عند ضغط منخفض التيار يكون محددًا بحجم الكاثود وفي بعض الحالات يحدد بحجم الأنود.

تيارات عالية جدًّا تزيد عن 500 أمبير ممكنة إذا كانت منطقة المهبط (الكاثود) كبيرة بما فيه الكفاية. الوهج الشاذ (D–E (abnormal يناظر الحد الذي عنده سطح الكاثود مغطى بالتفريغ الوهاجي، وكثافة التيار عند الكاثود عبر منطقة التوهج الشاذ. عندما ينخفض ضغط الغاز اقل من 100 باسكال (0.752 ملليمترًا زئبقيًّا) تحدث تصادمات قليلة، ويتغير الوهج إلى شعاع من الجسيمات المشحونة. يحدث انتقال من الوهج إلى القوس عند النقطة E إذا كانت منطقة التفريغ على سطح المهبط (جذور الكاثود) غير كافية للمحافظة على التفريغ الوهاجي. تفريغ القوس E–F بوجه العموم في حالة اتزان حراري ويتميز بتيارات عالية.

ويبين الشكل (3) الأجزاء المختلفة من التفريغ، المهبط (الكاثود) هو المصدر الرئيسي للتيار. المساهمة من الأيونات الموجبة صغيرة لأنها منخفضة السرعة، وهي تساعد في الحفاظ على توازن الشحنات. المصعد (الأنود) يعمل أساسا كبالوعة للإلكترونات، بالرغم من تواجد انحدار في الجهد العالي الناشئ عن العدد الصغير من الأيونات الموجبة في المنطقة.



شكل (3): الأجزاء المختلفة للتفريغ الكهربي

المنطقة بين الأقطاب تعرف باسم العمود وتقترب من توازن الشحنات. المناطق الهابطة المقابلة للأقطاب تنتج من اختلال توازن الشحنات الموضعية، وعمق هذه المنطقة وقطرها بالإضافة إلى كثافة التيار والمجال الكهربي تعتمد على نمط التفريغ الكهربي. صدر المناطق الهابطة هي مناطق الانتقال التي تناظر الانتقال من المناطق عالية المجال في مجابهة الأقطاب إلى المجال المنخفض في العمود. جهد التفريغ هو محصلة الجهود الساقطة عبر هذه المناطق، ويمكن التعبير عن جهد التفريغ V_d بالمعادلة:

$$V_c + V_a + V_l = V_d$$

حيث V_c جهد المهبط (الكاثود) الهابط

V_a جهد المصعد (الأنود)

V_l الجهد الساقط على طول العمود

عموما جهد العمود له مقاومة ديناميكية سالبة وتتغير مع التيار ويمكن التعبير عنها بالمعادلة:

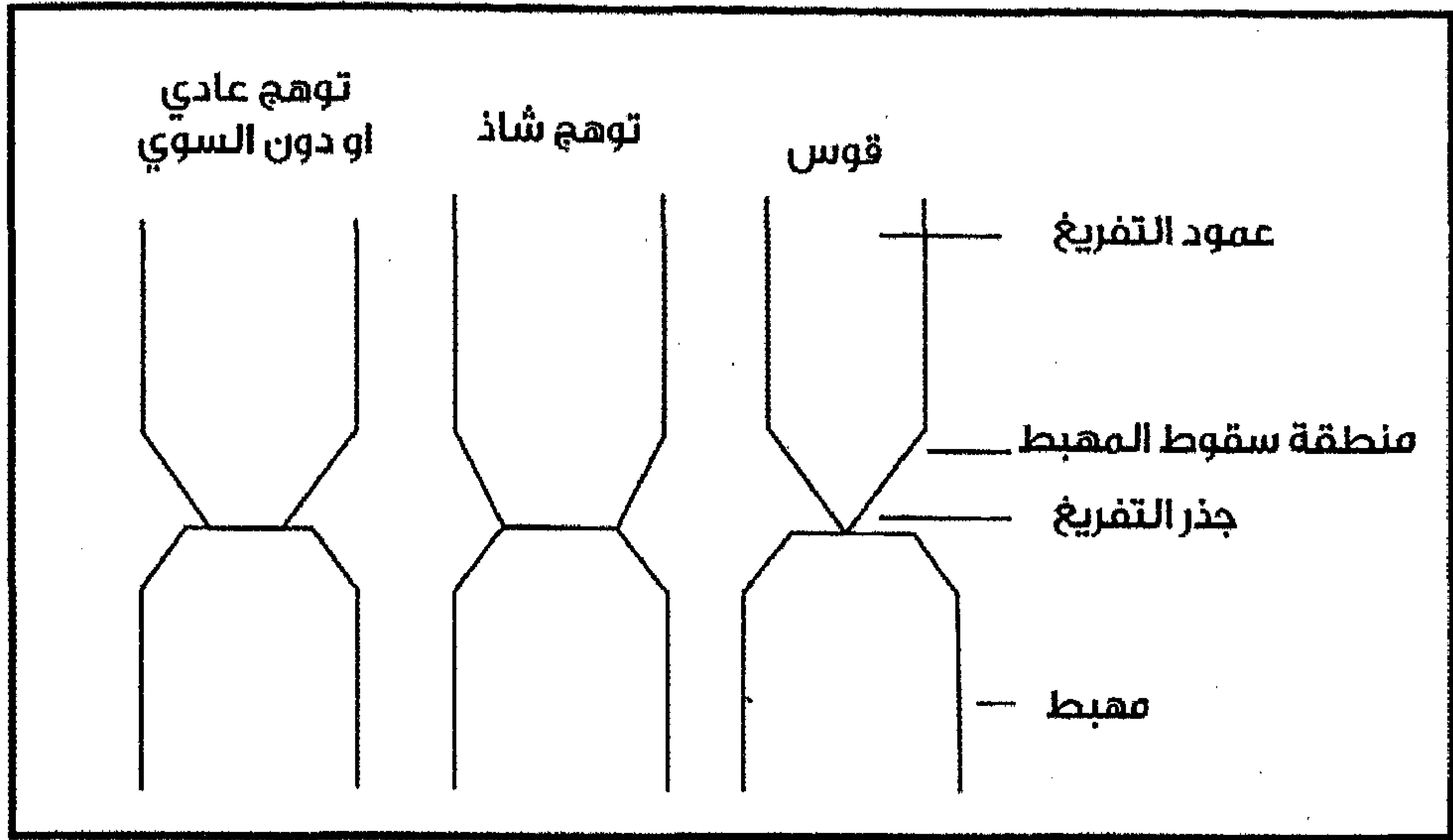
$$V_d = V_c + V_a + \frac{C}{I^2}$$

حيث C ثابت

جهد المهبط (الكاثود) الهابط يتغير مع كل من نمط التفريغ ودالة الشغل لمادة الكاثود ونوع الغاز وشدة التيار ودرجة الحرارة. جهد الأنود الهابط أيضا يتغير مع نمط التفريغ ودالة الشغل لمادة المصعد (الأنود) ونوع الغاز. ميل جهد العمود E_l يتغير بمدى واسع مع التيار ونوع وضغط الغاز ومقدار الشوائب.

المهبط (الكاثود):

التفريغ الكهربي أو البلازما هو تنظيم ذاتي بمعنى أنه ينظم نفسه ليلائم البارامترات الخارجية. أبعاد البلازما تحكم بالتوازن بين قوى التمدد والانكماش التي تتغير عن كونها صغيرة جدا في البلازما عند الضغط المنخفض إلى كونها عالية جدا كما في حالة القوس الكهربي ذي التيار العالي عند الضغط الجوي. التفريغ الوهاجي عند الضغط المنخفض يوضح تأثير التنظيم الذاتي. كثافة التيار عند السطح لدى قطب المهبط تحكم بمصدر الإلكترونات ويحدد نمط التفريغ. الشكل (4) يوضح أنماط المهبط المختلفة لكل من الوهج والقوس.



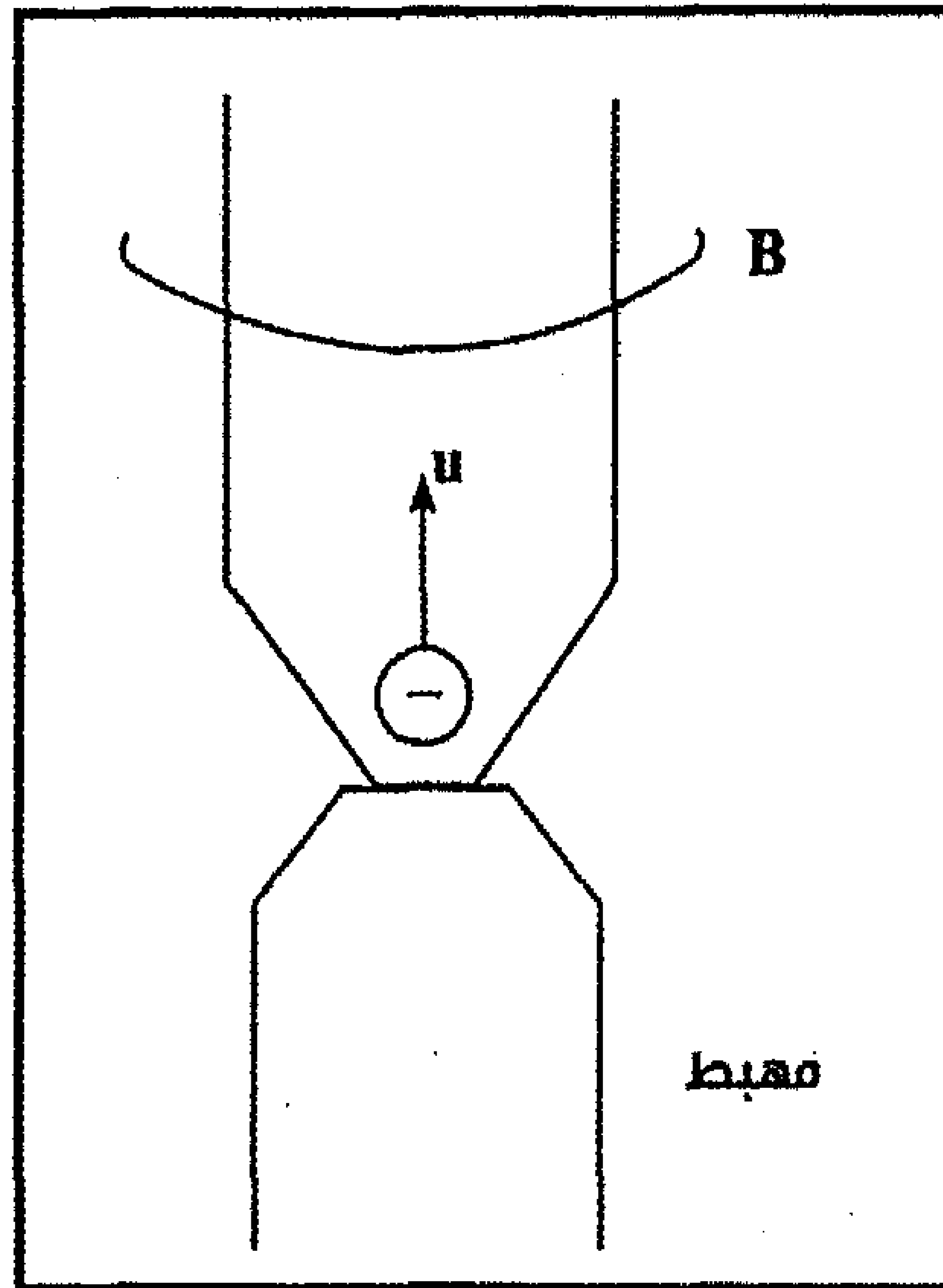
شكل (4): مهبط التفريغ الوهاجي والقوس

القوة الناتجة عن تفاعل المجال المغناطيسي الذاتي للبلازما مع تيار البلازما هي قوة انقباض نصف قطرية تتجه للداخل (انظر الشكل 5). قوة الانقباض المغناطيسية لكل وحدة طول تعطى بالعلاقة:

$$F = J_z^2 \mu_0 / 2\pi r$$

وهي تضاد قوة التنافر بين الإلكترونات التي تعطى بالعلاقة:

$$e^2 / 4\pi r^2 \varepsilon_0$$



شكل (5): التقلص والانفراج المغناطيسي للتفريغ الكهربي الناجم عن المجال المغناطيسي الذاتي للتيار.

الانبعاث الثانوي:

كثافة تيار المهبط للتفريغ الوهاجي يمكن أن تحفظ بالانبعاث الثانوي. يحدث الانبعاث الثانوي عندما تنتج الإلكترونات بقذف المادة بالجسيمات المشحونة (إلكترونات، أو أيونات، أو جسيمات أخرى). تنقل الجسيمات بعضًا من طاقة حركتها إلى الجسيمات المتعادلة عند السطح فتتحرر الإلكترونات منه. النسبة بين متوسط عدد الجسيمات الثانوية إلى العدد المكافئ للشحنات الابتدائية في التصادم مع السطح هو معامل الانبعاث الثانوي δ. معاملات الانبعاث الثانوي تتغير بنطاق واسع مع المواد التي تم قياسها. الجدول (1) يوضح معاملات الانبعاث الثانوي لعدد من المعادن الشائعة الاستخدام في الأقطاب أو أهداف الترسيب لعمليات ترسيب التفريغ.

جدول (1): القيمة العظمى لمعامل الانبعاث الثانوي لمواد مختلفة

Metal	δ_{max}	E (eV)
Ag	1.5	800
Al	1	300
Au	1.5	750
Cd	1.1	400
Cu	1.3	600
Fe	1.3	350
Mo	1.25	375
Ni	1.3	550
Pt	1.8	800
W	1.4	700

معاملات الانبعاث الثانوي لعدد آخر من المواد المستخدمة في عمليات البلازما وأيضا كأقطاب أو أهداف مبينة في الجدول (2).

جدول (2): معاملات الانبعاث الثانوي للإلكترونات

Substance[a]	δ = 1 at		δ_{max}	V(V) for δ_{max}
	V_1 (V)	V_2 (V)		
Li	-	-	0.5	85
K	-	-	0.7	200
Cu	>100	-	1.3	600
Ag، Au	-	-	1.5	800
W	-	-	1.5	500
C	160	~1000	1.3	600
Soot	-	-	0.4 – 0.8	500

Pt	-	-	1.6	800
Mo	140	1200	1.3	350
NaCl	~20	1400	6 – 7	600
MgO	-	-	2.4 – 4	400
Pyrex glass	30 – 50	2400	2.3	300 – 400
Soda glass	30 – 50	900	~3	300
Oxide cathode BOSrO	40 – 60	3500	5 – 12	1400
ZnS	-	6000 – 9000	-	-
Ca tungstate	-	3000 – 5000	-	-

الأسطح عالية الانبعاث لها دالة شغل منخفضة ومعامل الانبعاث الثانوي لديها يعتمد على طبيعة السطح والشوائب والغاز الممتز وغير ذلك تزيد من معامل الانبعاث. طاقة الإلكترونات الثانوية تقع في نطاق ما بين 20eV – 10.

مجال الانبعاث:

ظاهرة شوطكي Schottky (تأثير المجال المسارع في الانبعاث الثرميوني) ناشئة عن المجال الكهربي الذي يحدث أسفل سطح المهبط. القوة بين الشحنات تعطى بالعلاقة:

$$F = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 (2x_0)^2}$$

وبالتكامل من x_0 إلى ما لانهاية نحصل على طاقة الوضع:

$$\int_{x_0}^{\infty} F dx = \frac{e^2}{16\pi\varepsilon_0 x_0}$$

الجهد يخفض القوة إلى الصفر عند القيمة:

$$\frac{e^2}{16\pi\varepsilon_0 x_0} = e\phi = 0$$

$$x_0 = \frac{e}{16\pi\varepsilon_0\phi}$$

حيث ϕ دالة الشغل بوحدة إلكترون فولت

الانبعاث الثرميوني:

ثغرة الطاقة أو دالة الشغل ϕ هي أقل طاقة مطلوبة لتحرر الإلكترونات من سطح المعدن (المهبط) عند درجات حرارة أكبر من 2000 درجة سيلزيوس. تأثير تسخين المهبط يقلل الطاقة المطلوبة لتحرر الإلكترونات بطريقة مشابهة لعملية التبخر. الجدول (3) يوضح بعض البيانات الممثلة للانبعاث الثرميوني لبعض المعادن. أكاسيد المعادن عموما لديها نقاط انصهار عالية من المعادن ودوال شغل أقل. الجدول (4) يبين دوال الشغل لبعض أكاسيد المعادن.

جدول (3): بعض البيانات الممثلة للانبعاث الثرميوني

Metal	A_0 (m^{-2} K^{-2})	Work Function (eV)
W	70.0×10^4	4.55
Ta	55.0×10^4	4.25
Ni	30.0×10^4	5.15
Cs	160.0×10^4	2.14
Pt	32.0×10^4	5.65
Cr	48.0×10^4	4.50
Ba on W	1.5×10^4	1.56
Cs on W	3.2×10^4	1.36
C	-	5.0

جدول (4): دوال الشغل لأكاسيد المعادن عند درجات الحرارة العالية

Oxide	Work Function (eV)
BaO	1.0
CuO	5.2 – 5.4
Cu_2O	5.2 – 5.4
Th_2O_2	6
WO_3	3.5
ZrO_2	9.2

الجدول (5) يسجل كثافة التيارات لعمليات الانبعاث المختلفة كدالة في شدة المجال الكهربي. معظم مواد المهبط الأكثر شيوعا هي الألومونيوم المستخدم في التفريغ الوهاجي تحت الضغط المنخفض.

جدول (5): كثافة التيارات الثرميوني، المجال انبعاث المجال الثرميوني عند مجالات كهربية مختلفة

Electric field × 10^6 ($V\ cm^{-1}$)	Schottky decrease of W (V)	Thermionic emission j($A\ cm^{-2}$)	Field emission j($A\ cm^{-2}$)	Thermionic field emission j($A\ cm^{-2}$)
0	0	0.13×10^3	0	0
0.8	1.07	8.2×10^3	2×10^{-20}	1.2×10^4
1.7	1.56	5.2×10^4	22×10^{-4}	1.0 10^5
2.3	1.81	1.4×10^5	1.3	2.1×10^5
2.8	2.01	3.0×10^5	130	8×10^5
3.3	2.18	6.0×10^5	4.7×10^3	2.1×10^6

منطقة المهبط الساقط:

جهد المهبط الساقط لدى المهبط البارد للتفريغ المتوهج فوق منطقة الوهج العادي ناشئ عن الشحنة الحيزية (السالبة) في مجابهة المهبط، وهي دالة في مادة القطب ونوع وضغط الغاز. الجدول (6) يبين بعض القيم لعمق المهبط الساقط عند الضغوط المنخفضة لمواد وغازات مختلفة.

جدول (6): سمك المهبط الساقط بوحدة (سم – تور) عند درجة حرارة الغرفة

Cathode	Air	Ar	H_2	He	Hg	N_2	Ne	O
Al	0.25	0.29	0.72	1.32	0.33	0.31	0.64	0.24
C	-	-	0.9	-	0.69	-	-	-
Cu	0.23	-	0.8	-	0.6	-	-	-
Fe	0.52	0.33	0.9	1.30	0.34	0.42	0.72	0.31
Mg	-	-	0.61	1.45	-	0.35	-	0.25
Hg	-	-	0.9	-	-	-	-	-
Ni	-	-	0.9	-	0.4	-	-	-
Pb	-	-	0.84	-	-	-	-	-
Pt	-	-	1.0	-	-	-	-	-
Zn	-	-	0.8	-	-	-	-	-

القيم النموذجية لجهود المهبط الهابط تتغير خلال العديد من مئات وحدة فرق الجهد (الفولت) معتمدة على مادة وهندسة المهبط ونوع وضغط الغاز والشوائب. جهد المهبط الهابط للقوس مختلف في كل من المهابط الثرميونية والباردة. جهد المهبط الهابط للقوس عند الضغط الجوي حوالي 10 فولت للبواعث الثرميونية وحوالي 15 فولت لمواد المهبط البارد عند الضغط الجوي. شدة المجال الكهربي في منطقة المهبط الساقط للمهبط البارد في حدود $4\times 10^{6}\ Vmm^{-1}$ وكثافة التيارات المناظرة لتلك القيمة في حدود $0.1 - 1\ Amm^{-2}$ لدى الباعث الثرميوني وحتى $10^{4}\ Amm^{-2}$ للمهبط البارد. عمق المهبط

الساقط للمهبط البارد أقل من0.1mm الجدول (7) يلخص الفروق الأساسية بين عمليات الانبعاث الثرميونية والباردة.

جدول (7): مقارنة جذور القوس للانبعاث الثرميوني والمهبط البارد

Parameter	**Thermionic**	**Non-thermionic (cold cathode)**
Cathode fall region		
Voltage (V)	10	15
Depth (mm)	0.001	0.1
Electric field ($V\ mm^{-1}$)	10×10^3	150
Cathode root		
Temperature (K)	2800	2300
Movement	Stationary or slow movement	Rapid movement
Current density ($A\ mm^{-2}$)	$1 - 10^2$	$10^4 - < 10^6$

المصعد:

الوظيفة الأساسية للمصعد أنه يعمل كبالوعة للإلكترونات التي تصل من عمود القوس. بالرغم من فيض الأيونات الموجبة التي تنتج من تصادم الإلكترونات وأيضا الذرات المنبثقة، يوجد غشاء من الشحنة الحيزية السالبة الناشئة عن عدد من الأيونات الموجبة في المصعد الهابط.

الجدول (8) يبين بعض قيم جهد المصعد الهابط وعمقه عند الضغوط المنخفضة. هبوط الجهد فوق المصعد الهابط وكثافة القدرة عموما أقل من قيم المهبط، ولكن انتقال القدرة الكلية غالبا أكبر بسبب عظم الفيض الحراري الكلي على طول محور التفريغ، وهو أقل انقباضا عند المصعد.

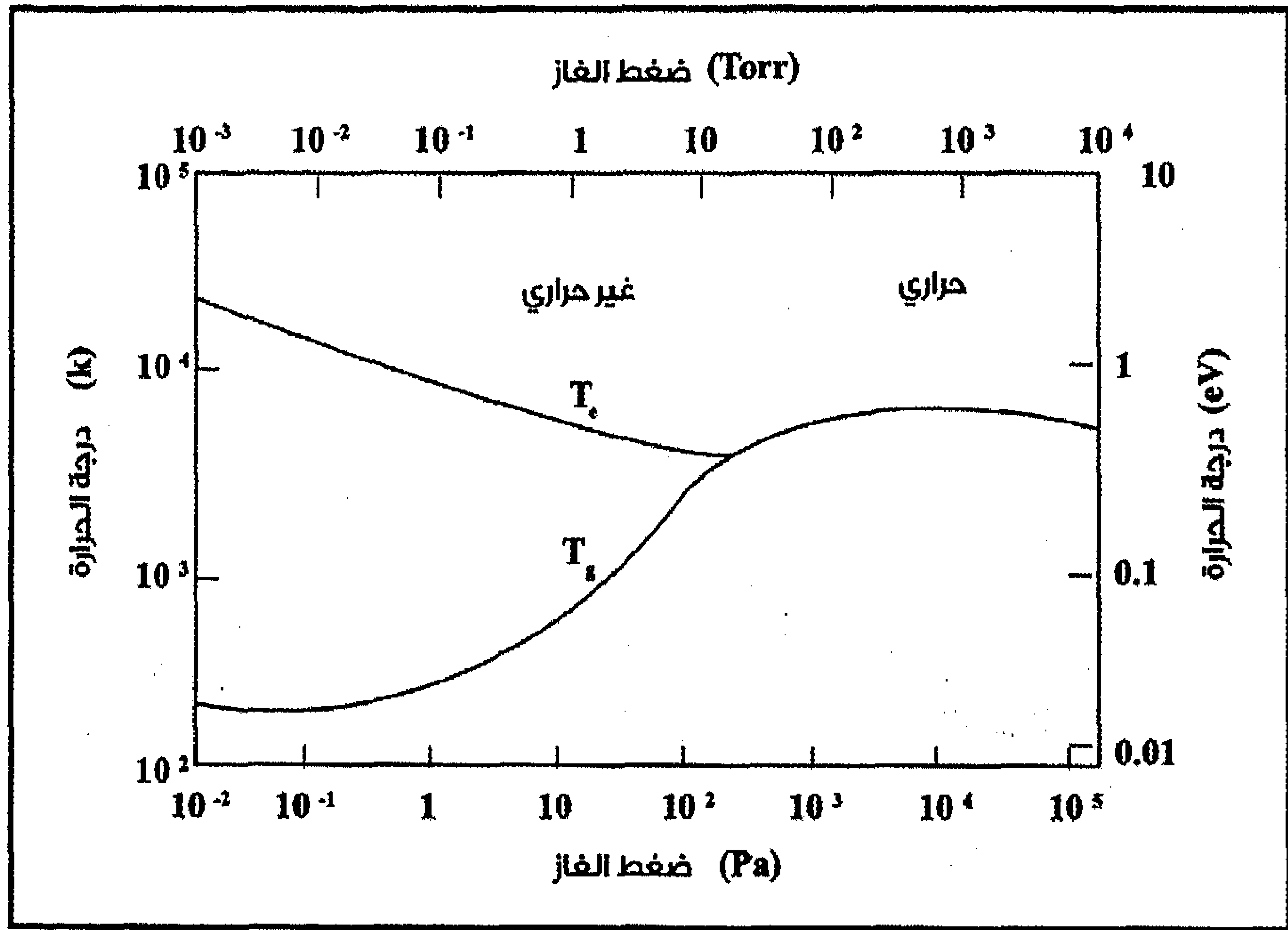
جدول (8): جهد المصعد الساقط V_A وسمك المصعد الساقط d_A لغازات مختلفة

Cas	Pressure (Torr)	V	d_a (cm)
H_2	1 – 5	17 – 19	0.5 – 0.7
N_2	0.8	16.5	-
O_2	1	14.2	-
	~ 0.1	-	> 0.12
He	10	26	-
Ne	10	17	-
Ar	20	10	-
	0.5	15.3	-

عمود التفريغ:

عمود التفريغ يحقق شروط البلازما التي تكون في حالة اتزان فوق المنطقة الأكبر من نصف قطر ديباي وتردد التصادم أكبر بكثير من تردد البلازما. أبعاد عمود التفريغ تحدد بطول مسار التفريغ (ليس من الضروري المسافة بين الأقطاب) والتوازن بين قوى التنافر والانقباض. مساحة المقطع العرضي للعمود في التفريغ الوهاجي فقط تعتمد على التيار، كمثال لذلك: اللمبات وأنابيب الليزر. كثافة التيار في العمود تتغير مع نوع وضغط الغاز والمواد المضافة وتغير الألوان مع الغاز. عند ضغوط الغازات المنخفضة يعمل عمود القوس في نمط الانتشار لأن قوى التنافر تصبح ذات أهمية ولكن في حالة الضغوط العالية المقتربة من الضغط الجوي ينقبض القوس. الشكل (6) يوضح تغير درجة حرارة الإلكترونات ودرجة حرارة الغاز مع ضغط الغاز للقوس إلى مستوى الضغط الجوي. عند الضغط المنخفض، طاقة الإلكترونات أكبر من الأيونات وقوة الانقباض تضاد بقوة التنافر للشحنات المتشابهة. كثافة التيار في عمود القوس تحكم بخصائص الانتقال في الغاز وهي أعلى بكثير، يوجد منها في حالة التفريغ الوهاجي، ويتغير مع ضغط الغاز. في

عمود القوس عند الضغط الجوي، التوازن بين ضغط الغاز وقوى الانقباض الكهرومغناطيسية. تغير المحتوى الحراري مع درجة الحرارة للعديد من غازات الغلاف الجوي عند الضغط الجوي موضحة بالشكل (7) والرسومات البيانية تبين تأثيرات الانحلال والتأين.

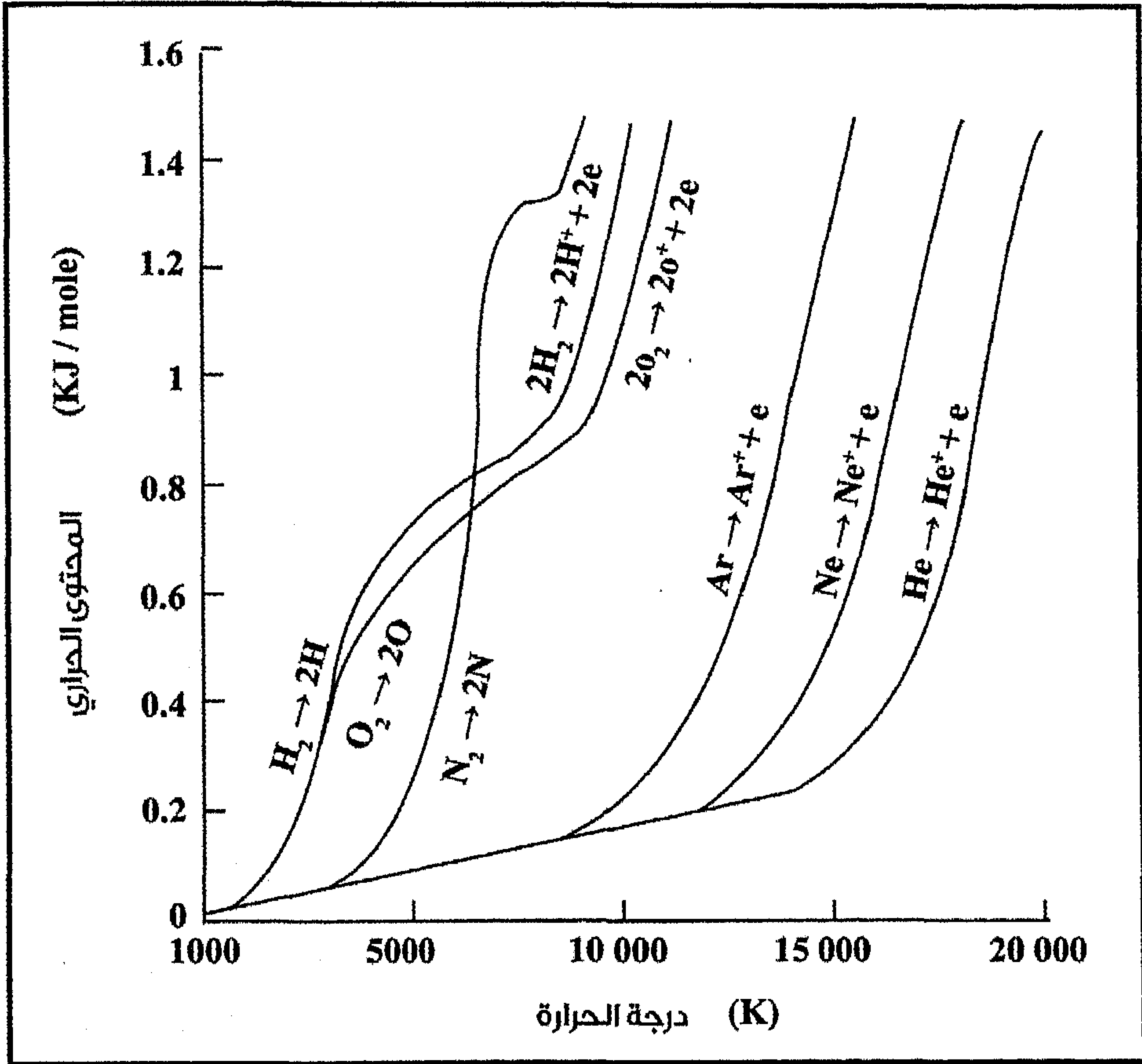


شكل (6): تغير درجة حرارة الإلكترون والغاز مع الضغط

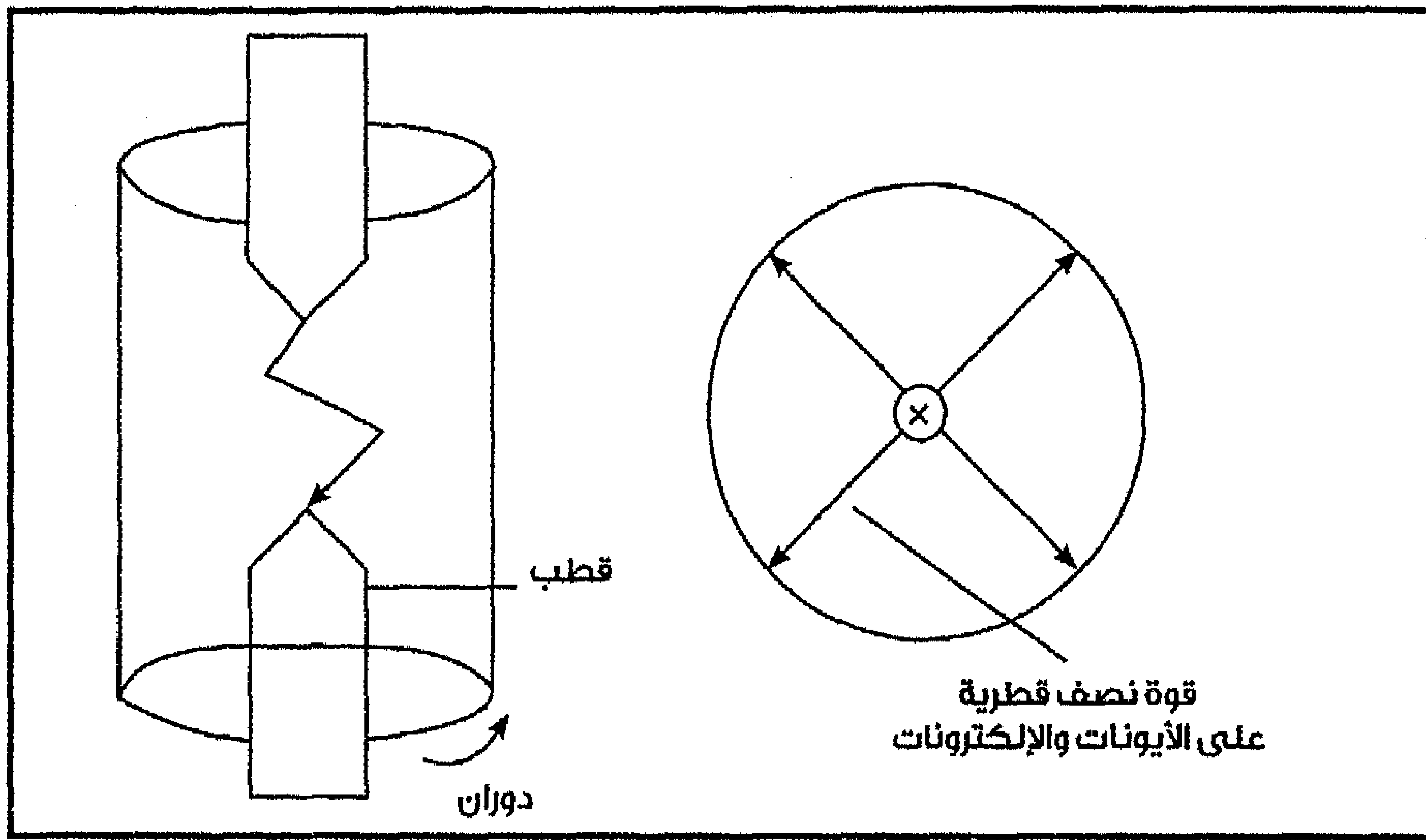
القوس يبرد طبيعيا بالحمل ويقل تأثير الحمل عند الارتفاعات العالية نتيجة لنقص قوة الجاذبية، ويمكن أن توضح بالحركة المغزلية للتفريغ التي تفرض قوة طرد مركزي على الأيونات التي تؤدي إلى تمدد عمود البلازما (انظر الشكل 8). ميل الجهد وبالتالي درجة الحرارة والقدرة (بفرض ثبوت تيار التغذية) يمكن أن تزداد عند الضغط الجوي مثل مشعل البلازما أو بالانقباض في لمبات الفلوريسنت.

تفاعل المجالات المغناطيسية مع البلازما:

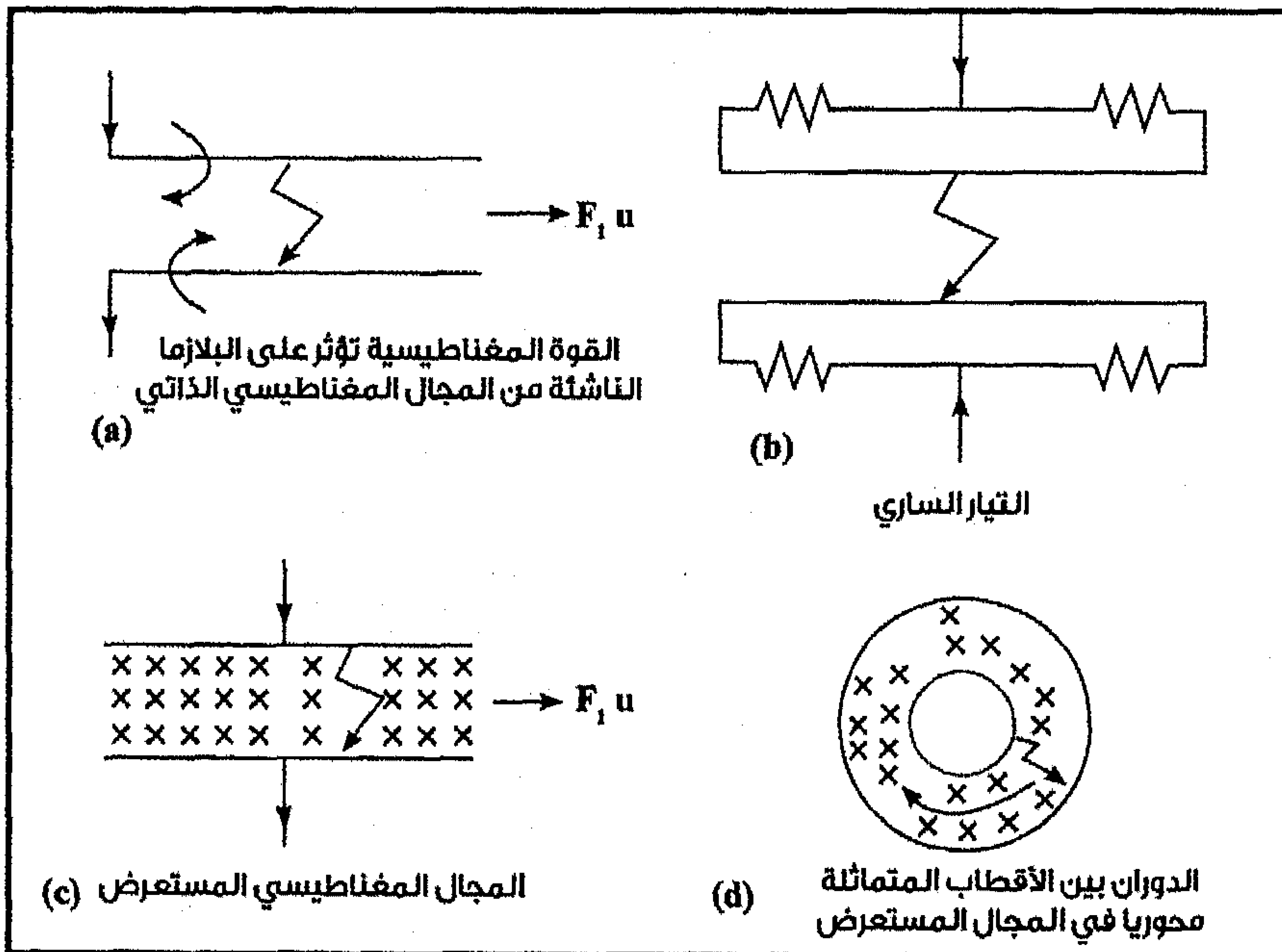
تفاعل المجالات المغناطيسية مع البلازما في اتزان الشحنات يكون سواء لكل من الأيونات والإلكترونات ولها نفس اتجاه السرعة. الشكل (9) يوضح أشكالًا مختلفة لأنواع التفريغ في المجالات المغناطيسية. قوة الانقياد المغناطيسية الناتجة من تفاعل المجال المغناطيسي الذاتي للتيار في الموصل (البلازما) وتيار التفريغ العمودي على كليهما موضح بالشكل (10).



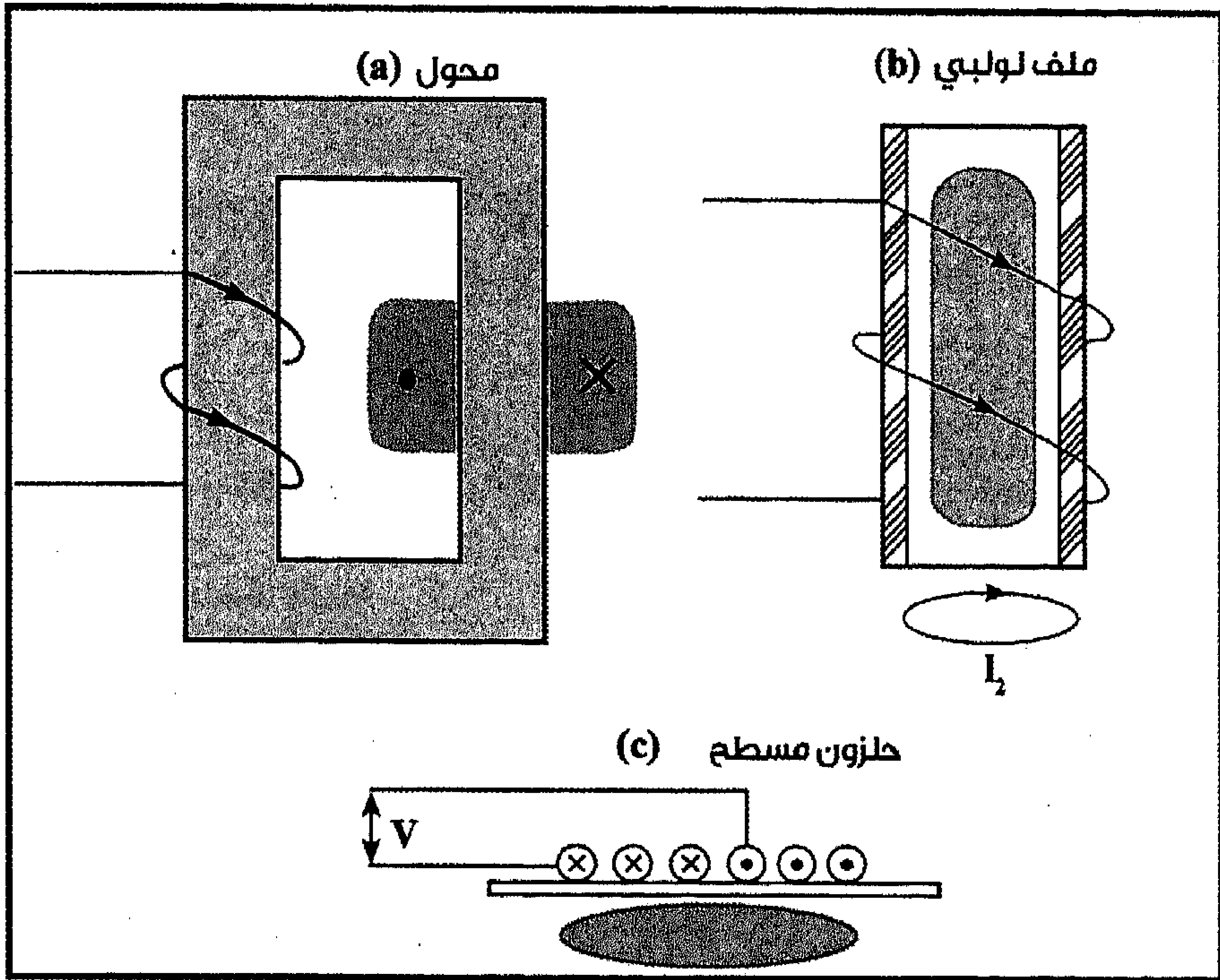
شكل (7): تغير المحتوى الحراري للغازات مع درجة الحرارة.



شكل (8): تأثير دوران قوس التفريغ



شكل (9) تأثير المجال المغناطيسي على القوس



شكل (10): أمثلة للبلازما المقترنة حثيا

ملخص الخصائص المميزة للتفريغ الوهاجي عند الضغط المنخفض وتفريغ القوس عند الضغط الجوي موضحة بالجدول (9):

جدول (9): الخصائص المميزة للتفريغ الوهاجي والقوس

Discharge region	**Representative values**	
	Glow	**Arc**
Cathode process	Secondary emission	Thermionic / field emission
Fall voltage (V)	300	8 – 15
Fall thickness (mm)	10	0.1 – 10
current density (A mm^{-2})	0.1	$10 – 10^4$

Anode		
Fall voltage (V)	20 – 30	3 – 12
Fall thickness (mm)	10	0.1
Current density (A mm^{-2})	0.1	10
Column		
Voltage gradient (V mm^{-1})	1 – 10	1
Current density (A mm^{-2})	2×10^{-3}	10
Mean temperature of neutral particles (K)	Close to ambient	6000
Number density (electrons m^{-3})	5×10^{15}	-

الاقتران الحثي:

اقتران البلازما حثيا (Inductively Coupled Plasma - ICP) معناه أن تقترن الطاقة بتيار الحث المشابه لطريقة محول الملف الثانوي للمحول (شكل 10) مع البلازما التي تعمل بمثابة لفة أحادية. التيار الساري في عروة البلازما يحدد من معادلات المحول:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \text{ and } I_1N_1 = I_2N_2 \text{ where } N_2 = 1$$

القدرة تقترن في الملف الثانوي (البلازما) وتكون دالة في كثافة الفيض المغناطيسي والتردد. عند الترددات المنخفضة يستخدم قلب المحول من مادة الفيرومغناطيسية (ذو مغناطيسية حديدية عالية النفاذية المغناطيسية) لزيادة الاقتران. عند الترددات التي تصل قيمتها حتى 20 كيلوهيرتز يستخدم القلب الحديدي. أما عند الترددات الأكثر من 400 كيلوهيرتز فيستخدم القلب الفيريت. في حالة الترددات العالية تقترن الطاقة بقلب من الهواء. تشَتُّت القدرة في البلازما وانتظام التوزيع يتأثران بكل من عمق القشرة والنواحي الهندسية. قطر المقطع العرضي للبلازما المتكونة بالبلازما الحلقية يكون مثاليًا لأقصى

قدرة، وكثافة الطاقة بين كثافة القدرات المنخفضة عند المقطع العرضي الصغير، وأعلى قدرة عند كثافة القدرات المنخفضة عند المقطع العرضي الكبير.

الملف الحلزوني (10-b) تقريبا ينتج بلازما حلقية. عمق البلازما الحلقية يتأثر بالفيض الناتج من مركبة التيارات الدائرية، وهذا التأثير يكون صغيرًا عندما يتحقق الشرط:

$$\delta \le D / 10$$

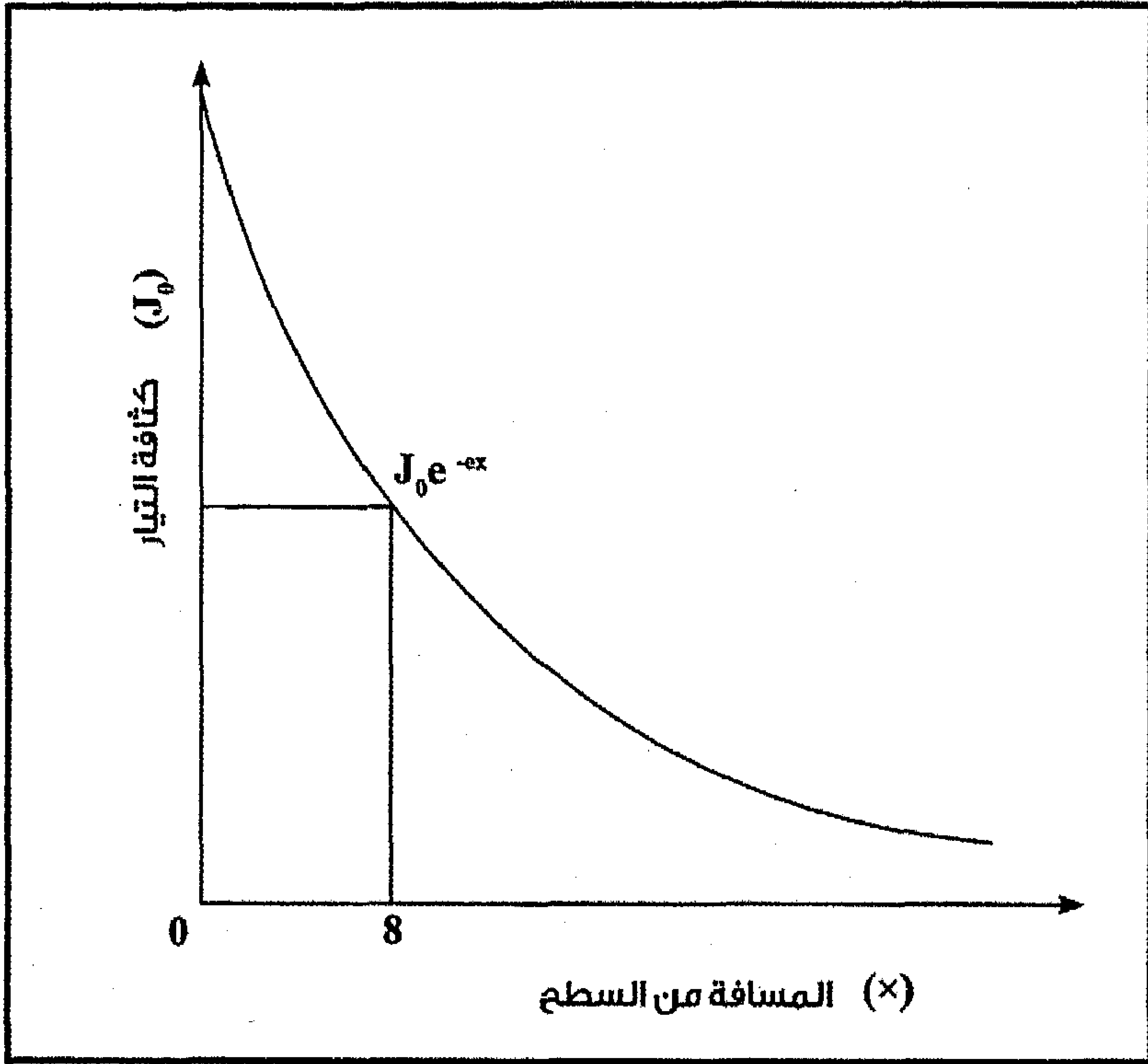
حيث D القطر الخارجي للبلازما الحلقية و δ عمق القشرة.

إذا كان تردد التصادم ν_c أكبر من تردد الإمداد، عندئذ الجسيمات لا تملك الوقت الكافي للاستجابة ويحدث امتصاص للقدرة في عمق القشرة بنفس الطريقة المشابهة في المعادن. أما في حالة تردد التصادم أقل من تردد الإمداد فإن الموجة تنفذ مثل انتقال الضوء خلال المادة الشفافة. سعة الموجة الساقط في وسط ما لانهاية تضمحل بصورة أسية من القيمة على السطح عند عمق القشرة (الشكل 11).

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega \sigma_s \mu_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

by writing $\sigma = e n_e (u_d / E)$ and $u_d = (eE / m_e)\, \tau_{ce}$

$$\delta = \sqrt{\frac{2m_e}{e^2 \mu_0}} \sqrt{\frac{\nu_{ce}}{n_e \omega}}$$



شكل (11): التوهين لكثافة التيار مع المسافة من السطح.

الجزء الأول من المعادلة ثابت لغاز ما، أي أن:

$$\delta \propto \sqrt{\frac{v_{ce}}{n_e \omega}}$$

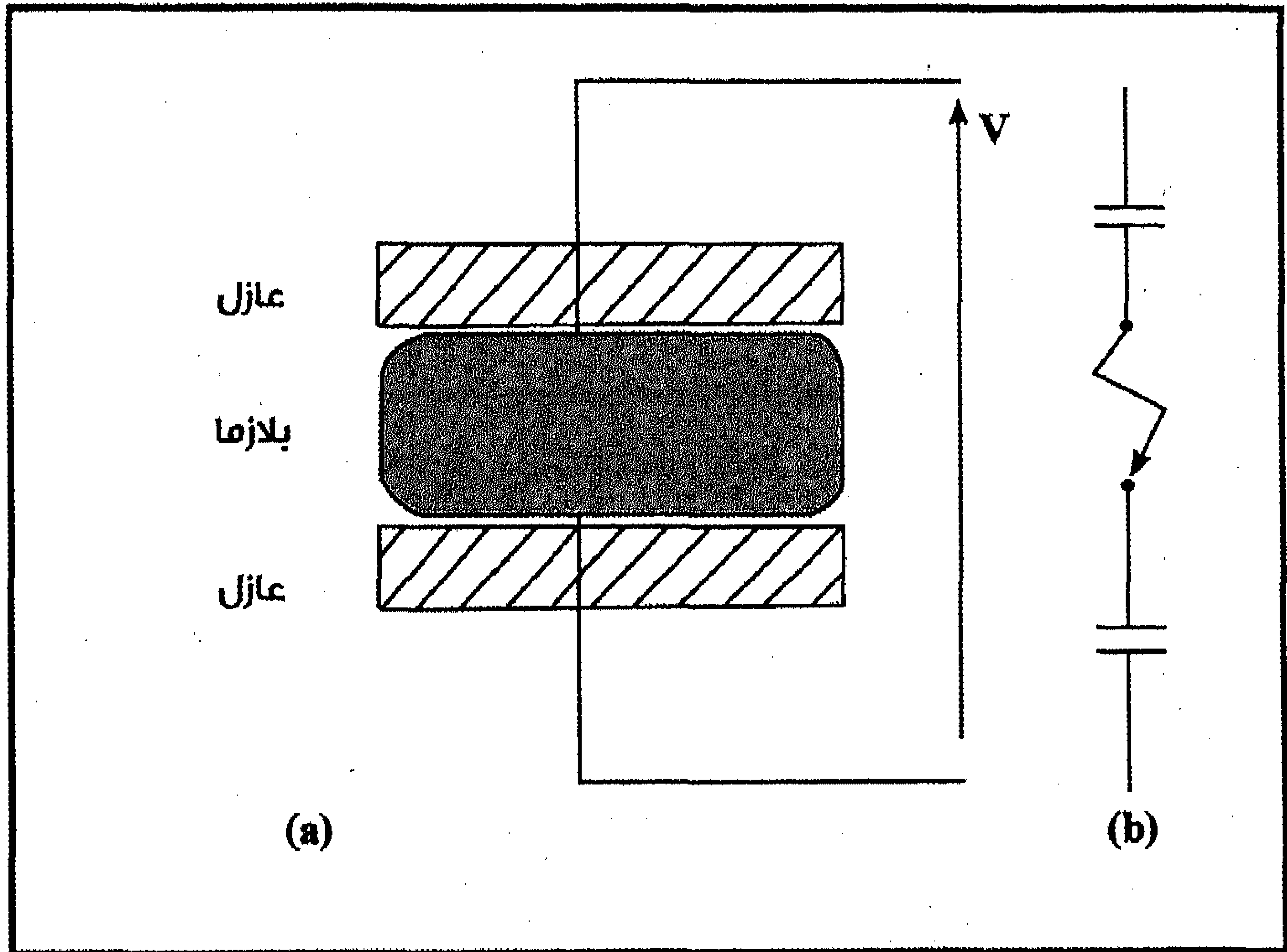
في حالة البلازما المحدودة، عمق القشرة هو مقياس دقيق لاختراق التيار:

$$\frac{D}{\delta} \geq 10$$

لأقصى قدرة متبددة في البلازما، عرض قناة البلازما ضعف عمق القشرة. الملف اللولبي المسطح (c – 10) ينتج بلازما موزعة بانتظام فوق مساحة كبيرة.

الاقتران السعوي:

الاقتران السعوي للبلازما (Capactively Coupled Plasma - CCP) هو طريقة مشابهة لتفريعات الاقتران المباشر عند الترددات العالية. وهي ممثلة بفقد العازل في سلسلة مع المكثفات التي تناظر الطبقات العازلة (الشكل 12). تقترن الطاقة بالبلازما بين الأقطاب المغطاة بطبقة العازل مع البلازما في الفراغ الواقع بينهما. التيار الساري في المكثف ناشئ عن قطبية الشحنة المترددة عند أسطح الألواح للمكثف، والتيار الساري عبر الثغرة ناشئ من إزاحة الشحنة على العازل كل نصف دورة. تعجل الإلكترونات وتتذبذب في وجود المجال الكهربي ويحدث التأين في حالة زيادة المجال.



شكل (12): البلازما المقترنة سعويا

ويمكن انتشار الموجه في البلازما بتحديد طاقة الاقتران الكهرومغناطيسية بالحث الكهربي في المجال القريب، والذي يحدد فعليًّا بظاهرة القشرة، وبخاصة للتغلب على كثافة الجسيمات المنخفضة. معادلة عمق القشرة هي مقياس جيد لكون الطاقة تمتص فعليًّا في البلازما أم لا، وتبين أن المتغيرات الوحيدة هي تردد المصدر وتردد التصادم وكثافة عدد الإلكترونات. للحصول على ارتفاع كثافة عدد الإلكترونات، من الضروري أن يكون تردد المصدر أقل من تردد التصادم الذي يتعذر تحقيقه عند الضغط المنخفض.

عند الضغط المنخفض، يصبح من الصعب تحقيق عدد مرتفع بما يكفي من الإلكترونات ذات الطاقة الكافية لنقل الطاقة لديها بدورها إلى الجسيمات الثقيلة للقيام بعمليات مثل الترسيب على الصعيد العملي. الترددات العالية تسمح بالاقتران في نظام الجسيمات حيث التصادمات تكون قليلة ولكن يمكن الحصول على طاقة عالية للجسيمات. ويمكن ارتفاع كثافة عدد الإلكترونات من خلال انتشار الموجات الكهرومغناطيسية داخل البلازما عند تردد رنين البلازما. تتشتت الموجات الكهرومغناطيسية عند السطح الفاصل للوسط ذي السماحية المختلفة بنفس طريقة انتشار الضوء حيث يحدث توهين واختراق وانعكاس للموجة. انتشار الموجات الكهرومغناطيسية يمكن أن يوصف بعلاقة التشتت:

$$\omega^2 = c^2 k^2 + x$$

حيث ω تردد الموجة الكهرومغناطيسية وc سرعة الضوء و x ثابت يعتمد على الوسط والعدد الموجي $k = 2\pi / \lambda$ ويوضح بالشكل (13). في حالة الوسط الموصل مثل البلازما غير الممغنطة تصبح العلاقة:

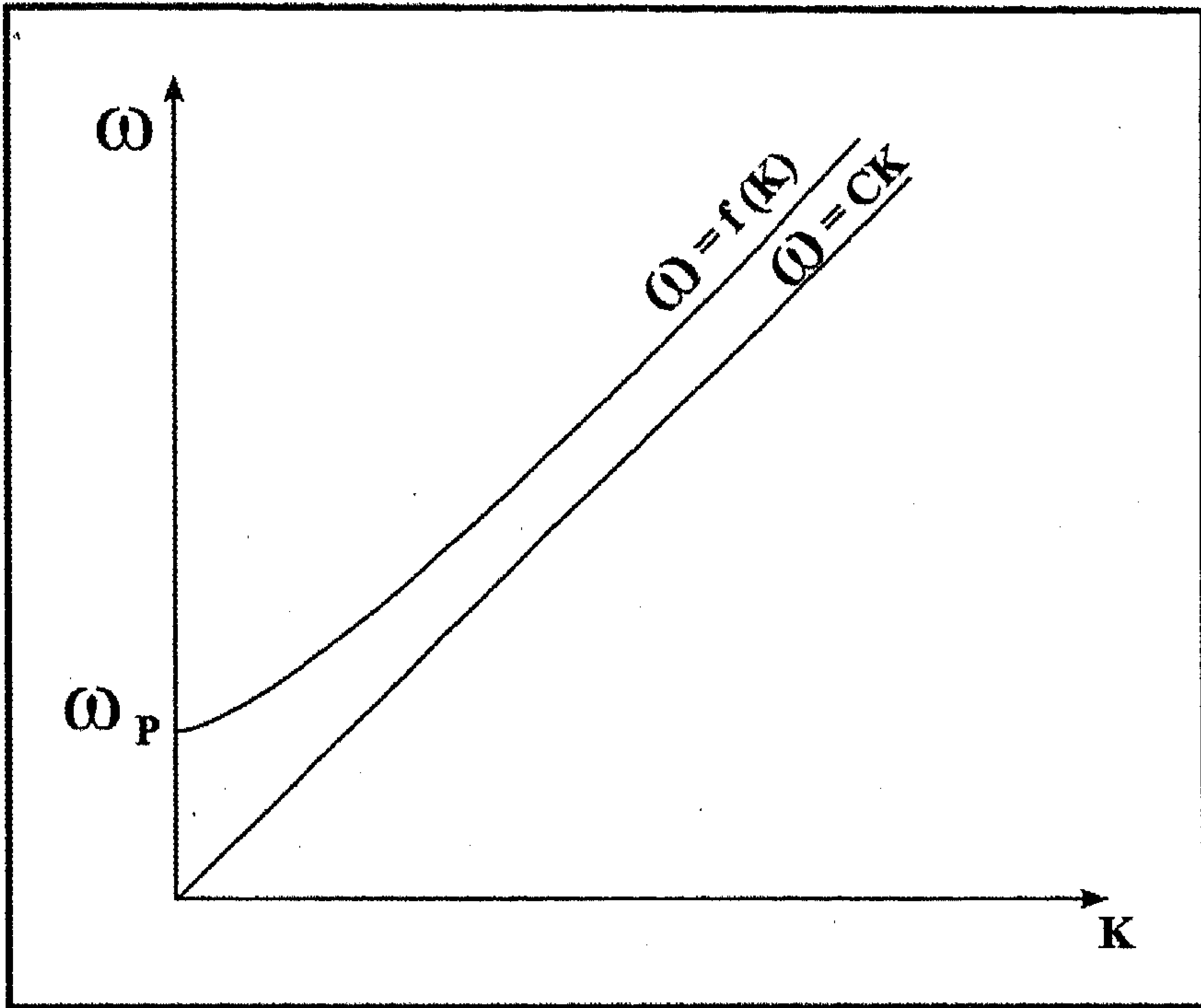
$$\omega^2 = c^2 k^2 + \omega_p^2$$

وتنفذ الموجة عندما يتحقق الشرط:

$$\omega > \omega_p$$

في حالة $\omega_p \leq \omega$ العدد الموجي يؤول إلى الصفر وتنعكس الموجة. السماحية الفعالة ε للبلازما هي:

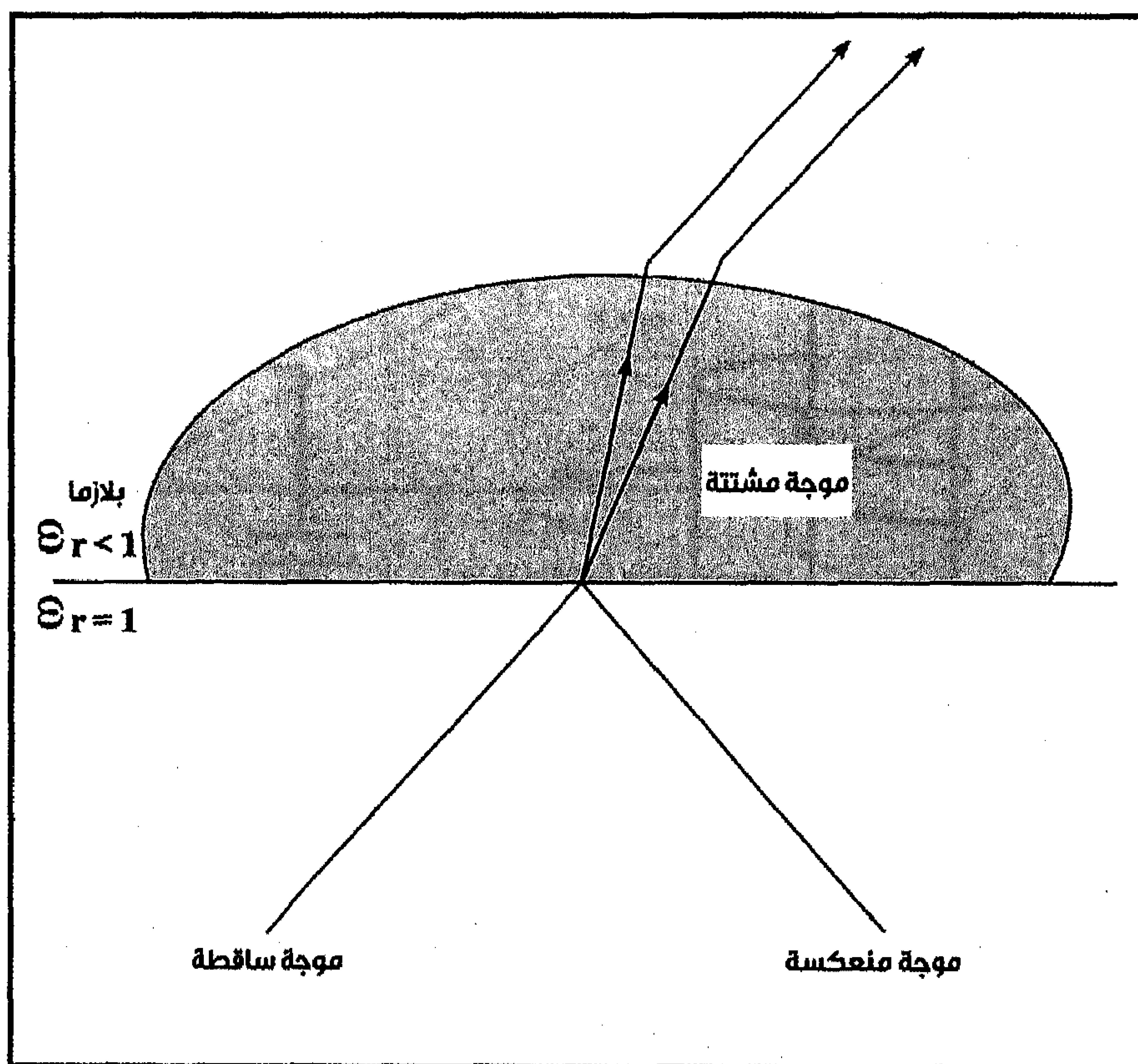
$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{n_e e^2}{m\omega^2}$$



شكل (13): تغير التردد ω للموجة الكهرومغناطيسية مع العدد الموجي k

أي أن السماحية للبلازما أقل من ε_0 يحدث انفراج بعيدا عن العمود. تزداد كثافة الإلكترونات من الصفر حتى الحافة بينما يقل معامل الانكسار ويزداد التشتت من الصفر إلى القيمة العظمى لكثافة الإلكترونات كما يتضح من الشكل (14)، وسوف تنعكس الموجة. وتنعكس الموجة بزيادة الكثافة أو غالبا ما يحدث توهين إلى الصفر. يحدث تبادل للطاقة باضمحلال لانداو Landau عند انتشار الموجة في البلازما. يحدث رنين عند

اقتراب التردد السيكلتروني للإلكترون من تردد الموجة الساقطة. سرعات الجسيمات الدوارة الأقل من السرعة الطورية للموجة سوف تسرع بينما تلك الأكبر من السرعة الطورية سوف تتباطأ وتفقد طاقة. إذًا تردد رنين البلازما هو متوسط السرعة وتوزيع السرعة ماكسويلي، عندئذ عدد الجسيمات أدنى تردد الرنين تكون اكبر من تلك التي فوق، وبالتالي يوجد كسب في الطاقة. أدنى تردد رنين في منطقة تفاعل جسيمات البلازما قادر على حجب الموجة وتصبح الموجة غير قادرة على الانتشار وتضمحل أسيا، وتنعكس إذا أصبحت كثافة الإلكترونات عالية بشكل كافٍ للسلوك الجماعي.

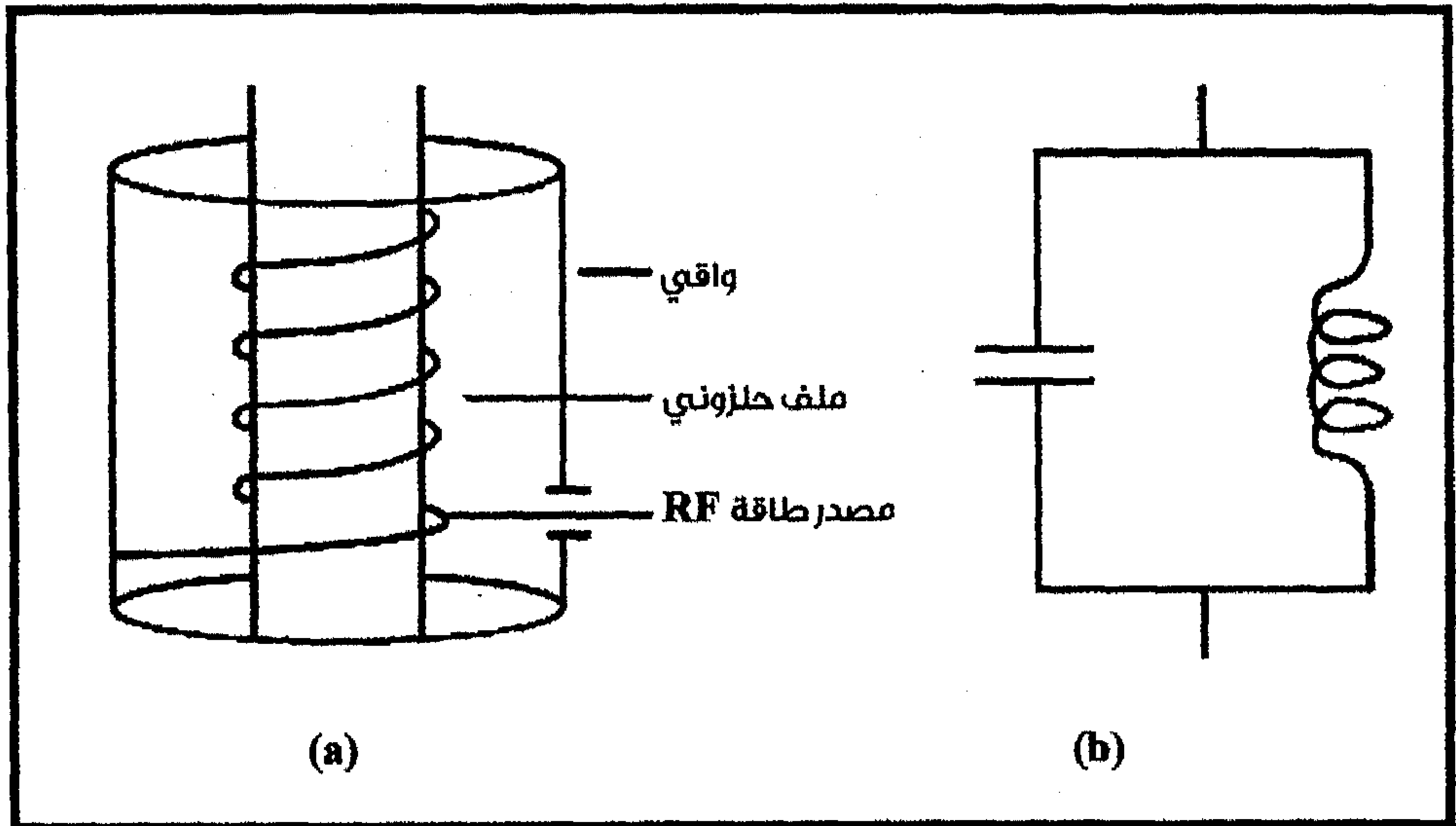


شكل (14): الموجة المرتدة عند السطح الفاصل لدى البلازما

في حالة إذا ما كان تردد الموجة أكبر من تردد البلازما تنتشر الموجة دون تضعيف، وعند تساوي تردد البلازما مع تردد الموجة تنعكس الموجة، حيث إن تردد البلازما يتناسب مع الكثافة العددية للإلكترونات.

الرنان الحلزوني:

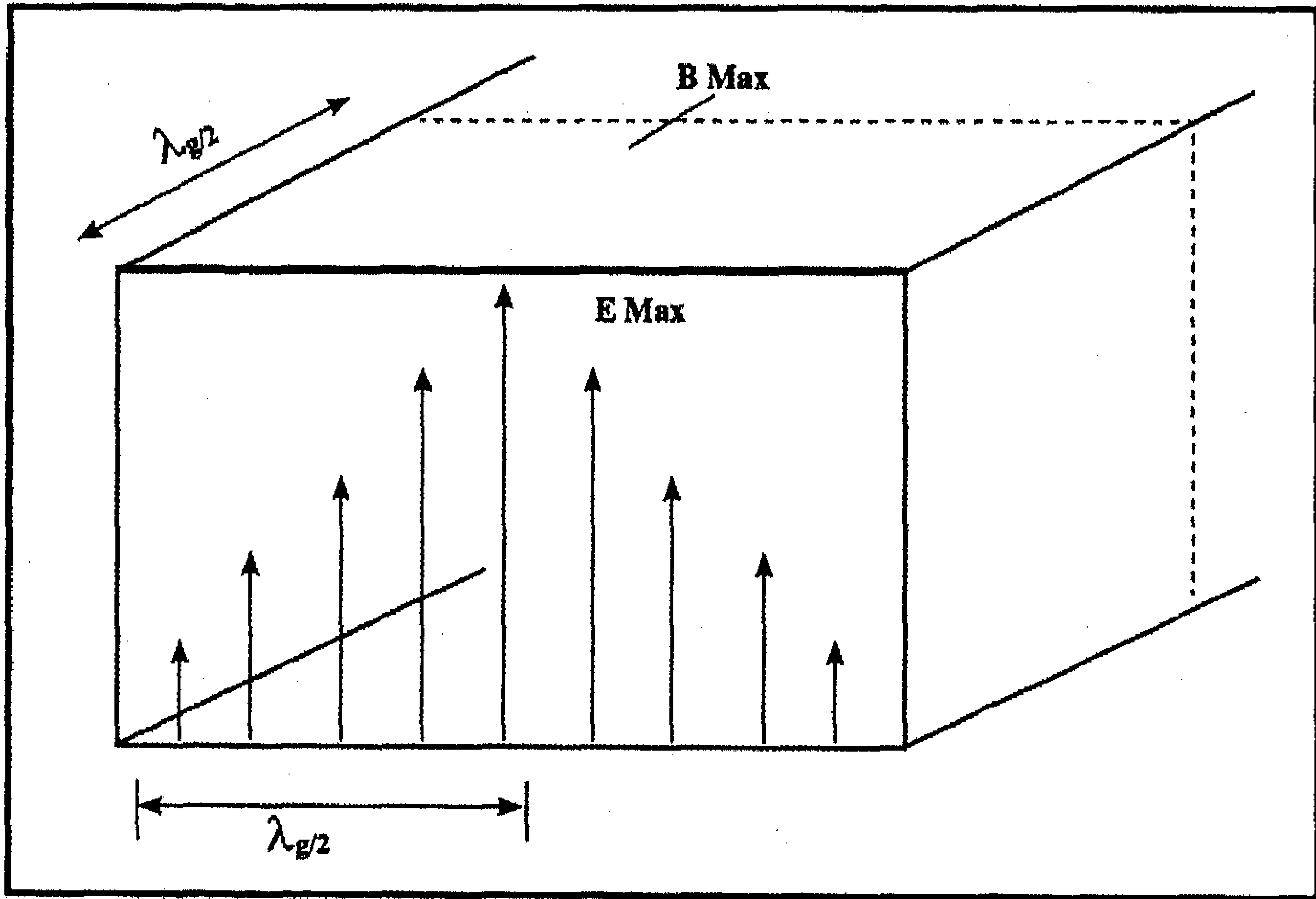
إحدى طرق زيادة امتصاص الطاقة بالبلازما عند الضغوط المنخفضة هو زيادة الفترة الزمنية أثناء حدوث انتقال الطاقة. ويمكن تحقيق ذلك في الرنان الحلزوني (شكل 15) الذي يتكون من ملف حلزوني، طول الموصل ربع أو نصف الطول الموجي للتردد الرنان. يحاط الملف بحاجب أرضي (ظاهرة القشرة أقل).



شكل (15): رسم توضيحي للرنان الحلزوني والدارة المكافئة

مرشد الموجة للميكروويف:

المجال الكهربي في مرشد الموجة (شكل 16) يتسبب في حدوث انهيار كهربي عند ضغط الغاز المنخفض، ونتيجة لذلك تتكون البلازما. ويعتبر مرشد الموجة بمثابة فجوة رنانة. توزيع المجال الكهرومغناطيسي في مرشد الموجة يوصف بنمط الكهرومغناطيسي المستعرض TE_{mn}، حيث يوضح مركبة المجال الكهربي المستعرض للموجة والرمز m and n كلاهما عدد صحيح (0، 1، 2، 3، إلخ) وهي تبين تركيب النمط المنتشر ويناظر عدد أنصاف دورات توزيع المجال الكهربي على الجوانب المتعامدة لمرشد الموجة. يحدد مرشد الموجة بكل من الارتفاع b والعرض a. في حالة العرض كون ضعف الارتفاع، يتبادلان المجالين الكهربي والمغناطيسي ليصلا إلى القمة عند4 / λ_g بعيدا عن محور مرشد الموجة.



شكل (16): توزيع المجال الكهرومغناطيسي في نمط المجال المستعرض لمرشد الموجة المستطيل

يحدد الطول الموجي بالنواحي الهندسية لمرشد الموجة. تردد القطع cut-off frequency يعطى بالعلاقة:

$$\omega^2 \mu\varepsilon \geq \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$$

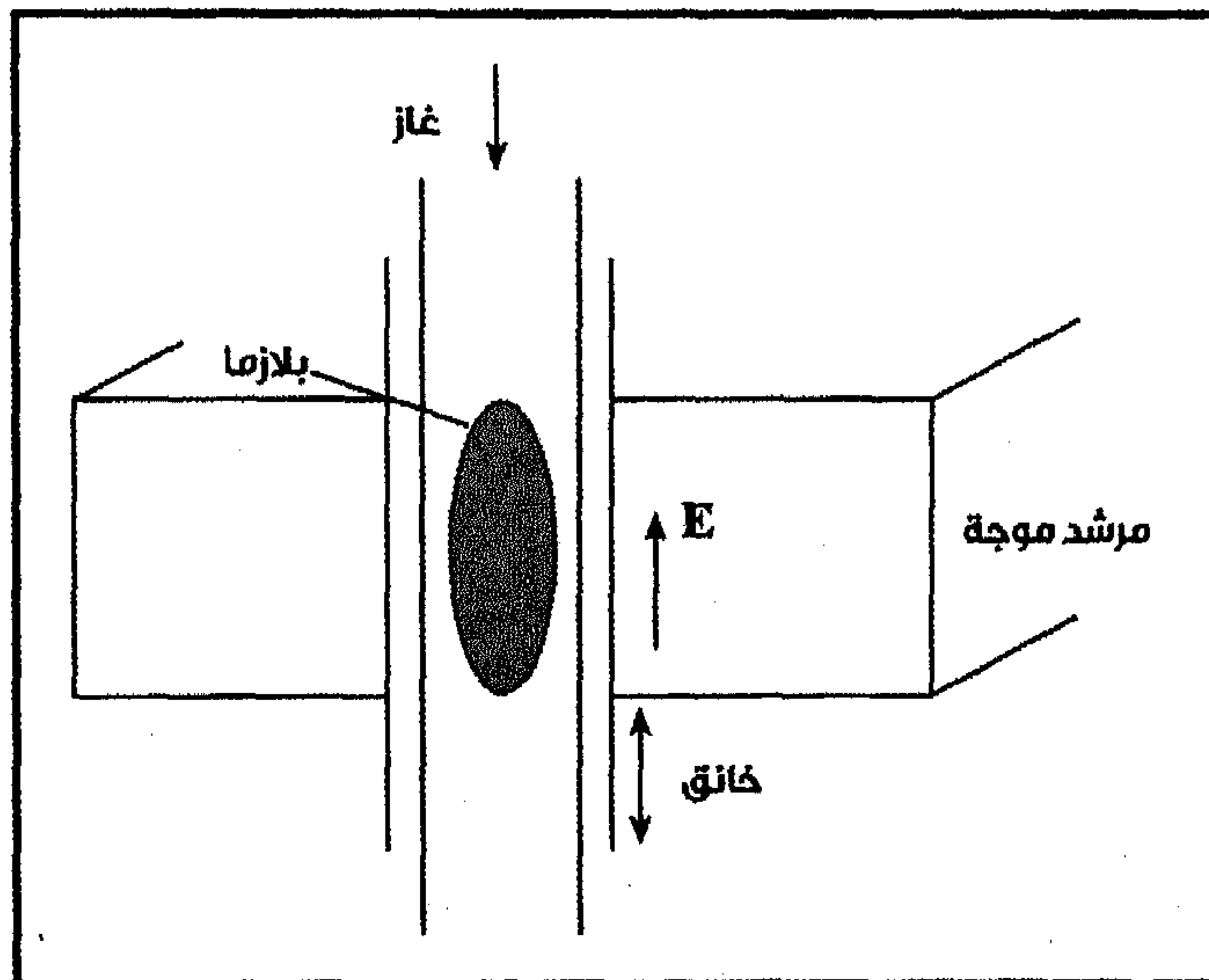
حيث m and n أعداد صحيحة

where m and n are integers. TE_{10} $m = 1$ and $n = 0$

الطول الموجي- القطع يعطى بالعلاقة:

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon_0}\, f_c} = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}}$$

عموما يعمل مرشد الموجة عند الضغط الجوي، والأنبوبة التي تحتوي على غاز البلازما تكون عند الضغط المنخفض حيث تمرر خلال منطقة المجال الكهربي العالي أو تنتقل الموجة من خلال نافذة معزولة. داخل المفاعل تستخدم فجوة دائرية لاقتران مرشد الموجة للبلازما (شكل 17).

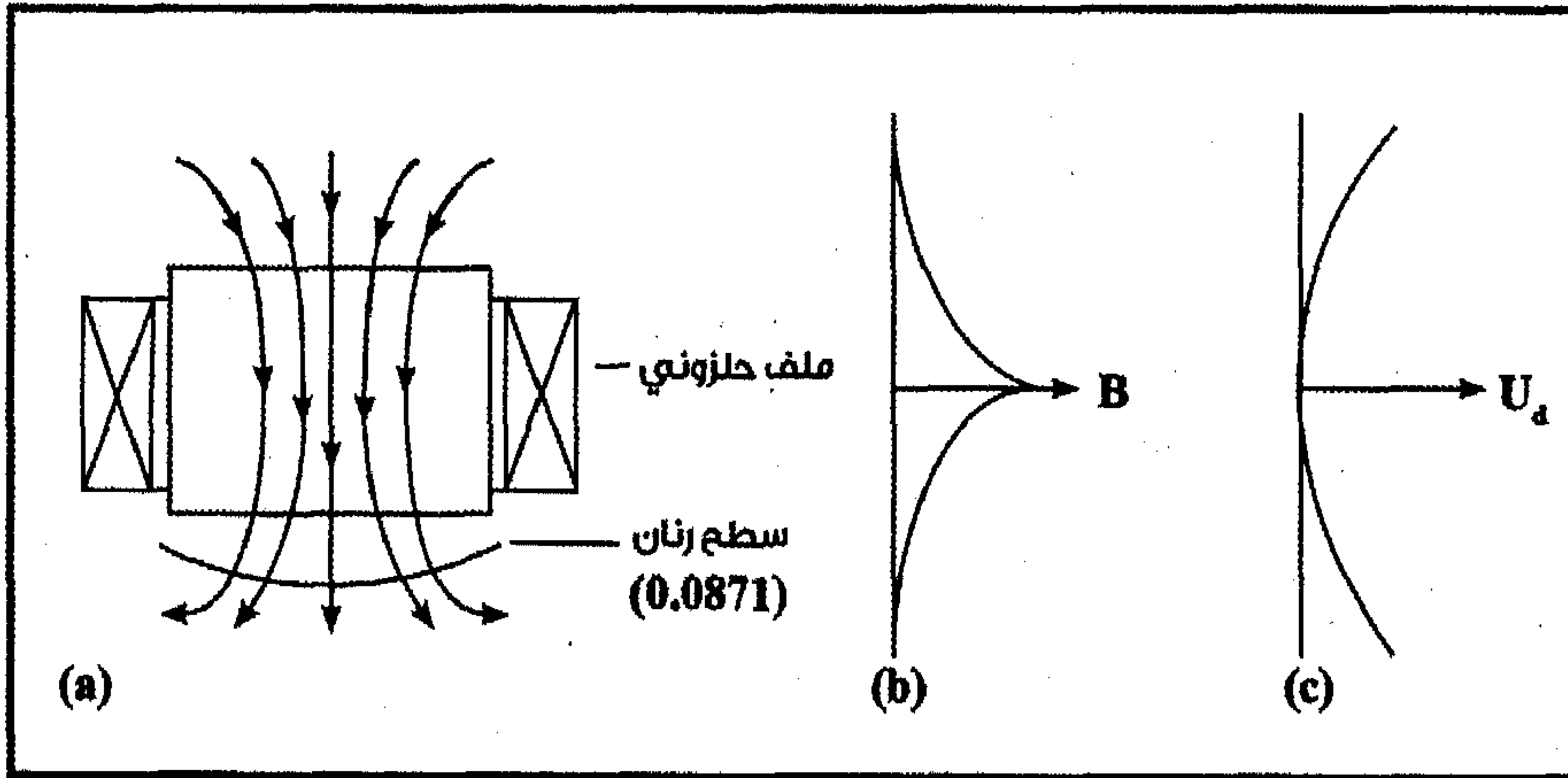


شكل (17): اقتران البلازما بمرشد الموجة

الرنين الإلكتروني السيكلتروني ECR:

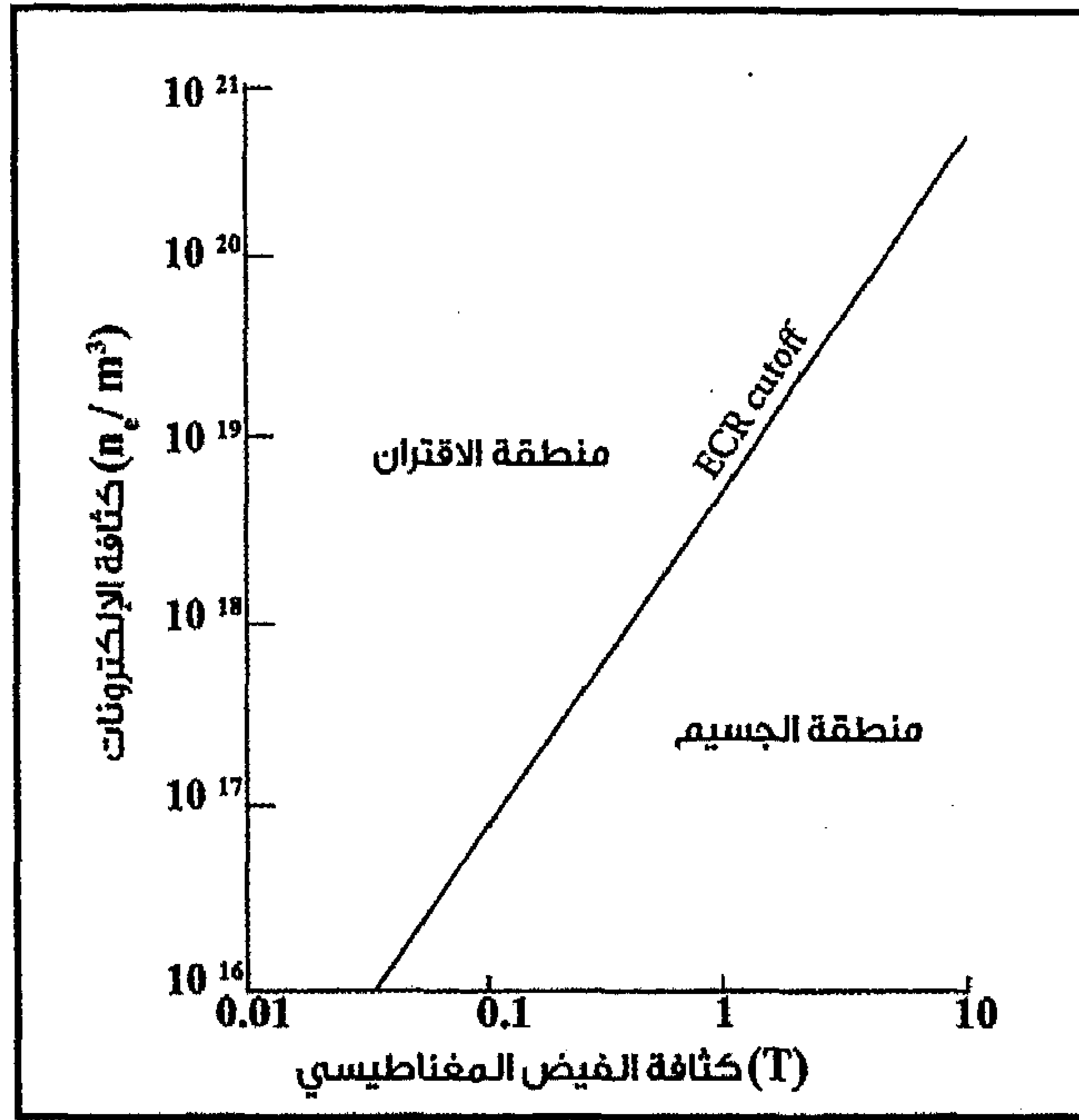
الرنان الإلكتروني السيكلتروني يوضح بالشكل (18) حيث يتفاعل المجال المغناطيسي المحوري مع الإلكترونات في الحلزوني الذي يدور عند سرعتها الدوارة. بينما يدنو تردد إلكترون البلازما من متوسط القدرة الممتصة بحجم يحتوي على n_e (الكثافة العددية) من الإلكترونات ليصبح متوسط القدرة:

$$P_{av} = \frac{n_e e^2 E_0^2}{2m}\left[\frac{\nu}{\nu^2 + (\omega_s - \omega_c)^2}\right]$$

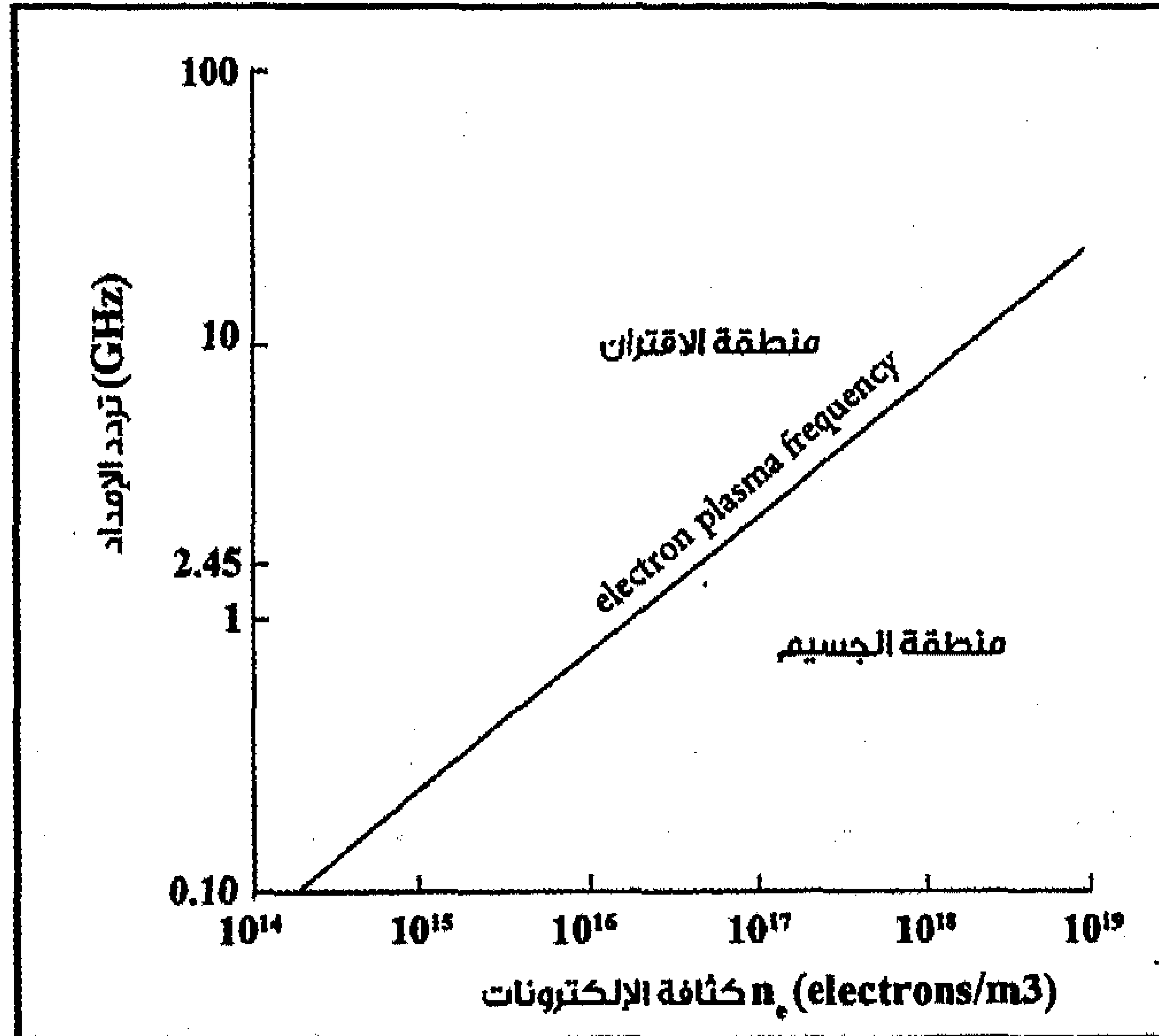


شكل (18): شكل المجال الكهرومغناطيسي المستخدم في ECR (a) المجال المغناطيسي (b) تغير كثافة الفيض المغناطيسي على طول محور الملف (c) تغير السرعة المحورية على طول محور الملف.

عندما يتساوى تردد المصدر بتردد الإلكترون السيكلتروني $\omega_s = \omega_c$ تزداد قدرة الدخل لتصل إلى القمة بسرعة. الشكل (19) يوضح تغير كثافة عدد الإلكترونات مع كثافة الفيض المغناطيسي عند تردد الإلكترون السيكلتروني. وتغير كثافة عدد الإلكترونات مع تردد المصدر عند تردد الإلكترون السيكلتروني موضح بالشكل (20).



شكل (19): تغير كثافة الفيض المغناطيسي مع الكثافة العددية للإلكترونات



شكل (20): تغير تردد مصدر الإمداد مع الكثافة العددية للإلكترونات

تزداد الكثافة العددية للإلكترونات في البلازما مع التردد، فمثلا عند التردد 2.45GHz أي المجال المغناطيسي 0.087Tesla يطابق كثافة عدد الإلكترونات حوالي $7.47 \times 10^{16}\ m^{-3}$.

كثافة عدد الإلكترونات عند تردد رنين الإلكترون السيكلتروني تعطى بالعلاقة:

$$n_{ce} = \frac{\omega_{pe}^2\, m_e\, \varepsilon_0}{e^2} = \frac{4\pi^2 m_e \varepsilon_0}{e^2} v_{ce}^2$$

إذا ما تم تحديد الكثافة العددية للإلكترونات ومعرفة تردد البلازما يمكن ضبط تردد الإلكترون السيكلتروني بتغير كثافة الفيض المغناطيسي، بمعنى $\omega_{ec} = \omega_p$ بالتعويض عن الثوابت في المعادلة والحل $f_{pe} = \omega_{pe/2\pi}$، $n_{ce} = 0.0124\ f_{pe}^2$ نحصل على تردد البلازما:

$$f_{pe} \approx 9\, n_e^{\frac{1}{2}}$$

وإذا تحقق الشرط:

$$\omega_e \leq \frac{\varepsilon_0 B}{m_e}$$

فإن الطاقة الساقطة سوف تشتت، وإذا تحققت العلاقة:

$$\omega_e \geq \frac{\varepsilon_0 B}{m_e}$$

عندئذ تخترق الموجة البلازما.

في حالة كون تردد الإلكترون السيكلتروني ω_{ce} أقل من تردد البلازما تستجيب الجسيمات بصورة فردية لتغيرات المجال الكهربي وتعاني تصادمات، وتمتص الطاقة التي تتحسن بالرنين (نظام الجسيمات). وفي حالة كون تردد الإلكترون السيكلتروني ω_{ce} أكبر

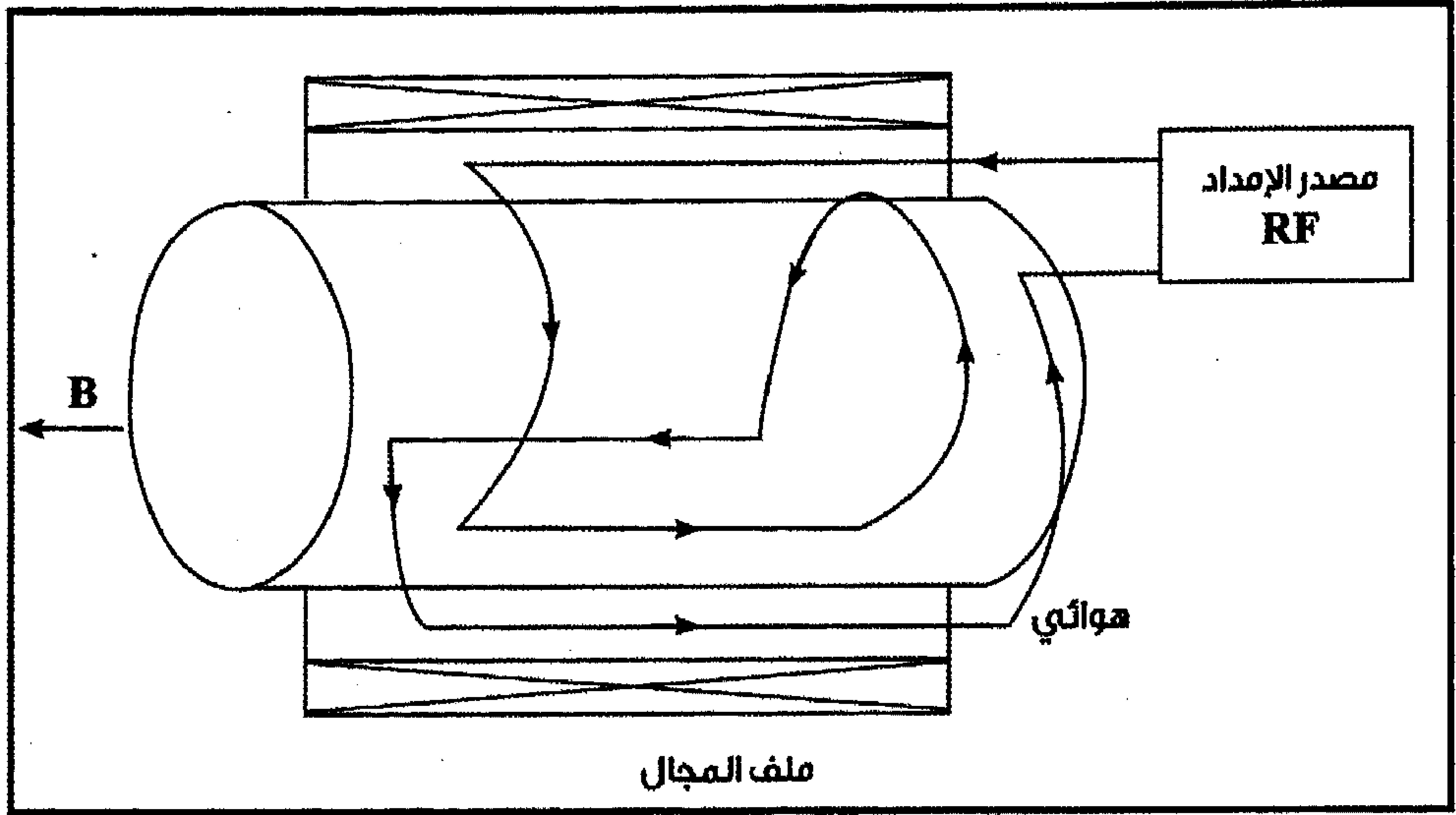
من تردد البلازما فإن الإلكترونات لا تستجيب للصورة الفردية نتيجة للقصور الذاتي وتسلك السلوك الجماعي. الإشارة تنعكس ولكن أيضا تخترق البلازما عبر مسافة محدودة وتتشتت وتضعف أسيا. عند الترددات العالية جدا والضغوط المنخفضة تتحسن طاقة الدخل نتيجة لتذبذب الجسيم المشحون عند ترددات الرنين ويحدث امتصاص.

يستخدم رنين الإلكتروني السيكلتروني ECR في تراكيب الشرائح الإلكترونية وأيضا في مركبات الفضاء، حيث يستخدم عدد كبير من الأيونات المقذوفة بسرعات عالية لتطور الدفع، ويستخدم تردد الأيون السيكلتروني في مفاعلات الاندماج النووي (التوكاماك).

مصدر البلازما الهليكون:

الأمواج الهليكونية يمكن أن تخترق البلازما، وهي ليست محددة بعمق القشرة مثل أمواج TE. تستخدم الأمواج الهليكونية أثناء تصنيع أشباه الموصلات وأبحاث الاندماج ومركبات الدفع في الفضاء وأيضا تصادفنا في الاتصالات. مفاعل البلازما الهليكوني لديه القدرة على إنتاج بلازما ذات طاقة عالية من مصدر ترددات الراديو عند شدة مجال مغناطيسي أقل من رنين الإلكترون السيكلتروني. ويمكن الحصول على كثافة عددية عالية من الأيونات ($n_i > 10^{17}\ m^{-3}$) عند الضغوط المنخفضة.

تسمى الأمواج الهليكونية بعد انتشار مسارها الحلزوني وتتميز بسماحية أقل من سماحية الفراغ ($\varepsilon_r < 1$)، وبناء على ذلك تنتشر بسرعة أقل من السرعة في الفراغ. يمكن إنتاج الأمواج الهليكونية في البلازما بوجود المجال المغناطيسي الساكن (شكل 21).



شكل (21): رسم توضيحي للمفاعل الهليكوني.

يتكون المصدر الهليكوني من أنبوبة معزولة قطرها حوالي 50 مم وطولها تقريبا 1.5 متر تحوي غاز البلازما عند ضغط منخفض ($1 - 10^{-3}$ Pa) محاطة بحلزوني يستخدم لإنتاج المجال المغناطيسي الساكن (0.01 – 0.1T) شكل الهوائي (الاريال) يحيط بالأنبوبة وعادة ما يغذى بمصدر RF عند تردد 13.56MHz حيث يكون الطول الموجي 22m في الفراغ الحر. الهوائي حول الأنبوبة يستحث المجال المغناطيسي في البلازما داخل الأنبوبة. تتحرك الإلكترونات حلزونيا حول خطوط المجال المغناطيسي على طول الأنبوبة بصورة أفضل من عرضها. أي أن المجال الكهربي أكبر على طول محور الأنبوبة. وتنتشر الأمواج الصوتية غير المشتتة في اتجاه انفراج المجال المغناطيسي.

الفصل الرابع

البلازما المقترنة بالحث ذات الانبعاث الطيفي

طرق الانبعاث الطيفي:

تعتمد طرق الانبعاث الطيفي على إثارة ذرات أو جزيئات المادة بواسطة الطاقة الإشعاعية أو الطاقة الحرارية والطاقة الكهربية، ثم قياس شدة الأشعة المنبعثة من هذه الذرات أو الجزيئات بعد رجوعها إلى حالة الاستقرار. وتنقسم طرق الانبعاث الذري الطيفي إلى عدة أقسام:

1- طريقة الانبعاث الذري اللهبي للطيف: تعتمد هذه الطريقة على إثارة ذرات المادة الموجودة في الحالة الغازية بواسطة حرارة اللهب، ثم قياس شدة الأشعة المنبعثة من هذه الذرات.

2- طريقة الانبعاث الذري الكهربي: تعتمد هذه الطريقة على إثارة ذرات المادة الموجودة في الحالة الغازية بواسطة الطاقة الكهربية، ثم قياس شدة الأشعة المنبعثة من هذه الذرات.

3- طريقة التألق الجزيئي للطيف: تعتمد هذه الطريقة على إثارة جزيئات المادة في المحلول بواسطة حزمة من الأشعة المرئية أو فوق البنفسجية، ثم قياس شدة الأشعة المنبعثة من هذه الجزيئات.

4- طريقة التألق الذري للطيف: تعتمد هذه الطريقة على إثارة ذرات المادة في الحالة الغازية بواسطة حزمة من الأشعة المرئية أو فوق البنفسجية، ثم قياس شدة الأشعة المنبعثة من هذه الذرات.

5- طريقة التألق الذري للأشعة السينية: تعتمد هذه الطريقة على إثارة ذرات المادة في الحالة الغازية بواسطة حزمة من الأشعة السينية، ثم قياس شدة الأشعة السينية المنبعثة من هذه الذرات.

مناطق الطيف:

يتألف الطيف الكهرومغناطيسي من مجموعة من المناطق(أمواج الراديو، الرادار، تحت الحمراء المرئية، فوق البنفسجية، أشعة إكس وجاما... وغيرها). تتفاوت في أطوال أمواجها حيث تتراوح بين قيم صغيره جدا وأخرى كبيرة؛ لذا فان الوحدة المستخدمة للتعبير عن أطوال الموجات تعتمد على منطقة الطيف الكهرومغناطيسي، فالموجات الطويلة تقاس بـ(المتر) والقصيرة تقاس بـ(النانومتر). الجهاز الطيفي هو دراسة المادة عن طريق التحقيق في الضوء والصوت أو الجزيئات التي تنبعث أو تمتص أو تتناثر من خلال المادة قيد البحث. ويمكن أيضا تعريف الجهاز الطيفي بأنه دراسة التفاعل بين الضوء والمادة. ومن الناحية التاريخية، يشير الجهاز الطيفي لفرع من العلوم التي كانت تستخدم الضوء المرئي للدراسات النظرية على بنية المادة والتحليلات الكمية والنوعية. في الآونة الأخيرة - مع ذلك - وسع التعريف كتقنيات جديدة تم تطويرها بحيث تستخدم ليس فقط الضوء المرئي، ولكن العديد من الأشكال الأخرى من الإشعاع الكهرومغناطيسي، وغير الكهرومغناطيسي: الموجات الدقيقة وموجات الراديو والأشعة السينية والإلكترونات والفوتونات (الموجات الصوتية).

المطيافية (Spectroscopy): هو علم دراسة التأثر بين الإشعاع (سواء كان كهرومغناطيسيا أو إشعاع جسيمات) والمادة التي تشمل الذرات والجزيئات. في حين تكون القياسات الطيفية هي قياس هذه التأثرات سواء كانت عملية امتصاص أو انبعاث أو تبعثر (استطارة) للطيف الكهرومغناطيسي والأجهزة التي تقوم بهذه القياسات التي تدعى بالمطياف أو بالراسم الطيفي.

المطيافية تستخدم غالبا في الكيمياء الفيزيائية والتحليلية للتحليل النوعي والكمي للمواد الكيميائية سواء كانت ذرية باستخدام الأطياف الذرية لتلك العناصر، أو جزيئات باستخدام الأشعة المرئية أو فوق البنفسجية أو تحت الحمراء. تستخدم المطيافيات أيضا بكثرة في علم الفلك والاستشعار عن بعد . تملك التلسكوبات الكبيرة جدا دوما مطيافا لقياس إما التراكيب الكيميائية أو الخواص الفيزيائية للأجرام الفلكية أو قياس السرعات حسب إزاحة دوبلر للخطوط الطيفية.

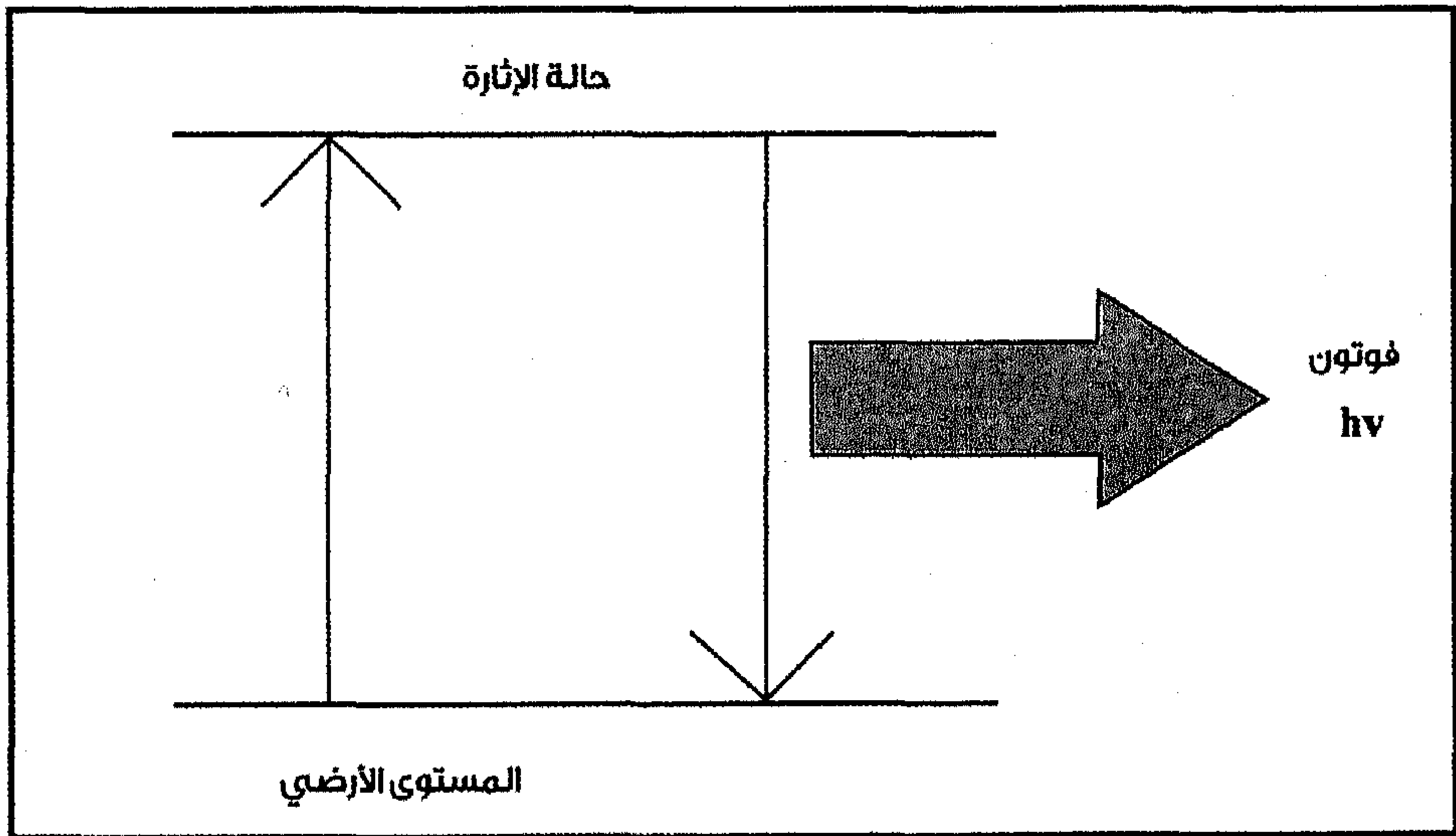
الانبعاث الذري الطيفي:

يستخدم الانبعاث الذري الطيفي لهبًا ذا درجة حرارة عالية - القوس الكهربائي أو البلازما الأرجوان - لإثارة الذرات إلى حالات الكترونية عالية. عندما تكون الذرات في حالة الاسترخاء في المدار الأرضي، ينبعث الضوء بخاصية الطول الموجي للذرة. يمكن فصل أطوال هذه الموجات بواسطة المنشور أو محزوز الحيود ويتم قياس كثافتها عن طريق تشغيل المحاليل معلومة التركيز، يمكن تحويل شدة الضوء إلى التركيز. وتشمل الأمثلة على هذه التقنية البلازما المقترنة بالحث ذات الانبعاث الطيفي. في هذه التقنية لتحليل عينات من المعادن والمحاليل المائية عادة، يتم تمريرها إما إلى لهب أو نظم فرن الجرافيت. يتم تحليل العينة وأي مركبات. وتكون النتيجة ذرات حرة من العناصر المستمدة من العينات علقت في سحابة في الفرن أو مختلطة في اللهب، ثم يتم قياس تركيز ذرات من قبل الامتصاص الطيفي عند خاصية الطول الموجي للذرة. يستخدم الضوء المشتق من مصابيح صممت لتطلق الخطوط الذرية ذات الصلة. ومن خلال معايرة مع محاليل المعادن معلومة التركيز، فإنه يمكن تحويل شدة الامتصاص الذري إلى وحدات التركيز.

الانبعاث الطيفي:

طيف الانبعاث(Emission Spectra) : تعطي العناصر عند امتصاصها كمية كافية من الطاقة طيفًا يُسمى طيف الانبعاث، فلو سُخن عنصر ما باللهب، أو بواسطة قوس

كهربائي فإن الطاقة التي يمتصها هذا العنصر تؤدي إلى إثارة ذراته، بمعنى أن هذه الطاقة التي سلطت على ذرات العناصر أدت إلى اختلاف مواضع الإلكترونات في تلك الذرات، أو بعبارة أخرى فإن ذرات العنصر تحتوي في الظروف العادية على أقل كمية من الطاقة وهي مستقرة؛ لذلك تُسمى هذه الحالة بحالة الاستقرار، أو الحالة الأرضية Ground State. أما إذا تعرضت لكمية من الطاقة فإن الإلكترونات وخصوصًا الموجودة منها بعيدًا عن النواة تمتص كمية من هذه الطاقة مما يجعلها تنتقل إلى مستوى طاقة أعلى من المستوى الذي كانت عليه، وفي هذه الحالة يُقال إن الذرات في حالة إثارة Excitation State وعندما تعود الذرات من حالة الإثارة إلى حالة الاستقرار ثانية بعد زوال المؤثر الخارجي «الطاقة» فإنها تطلق الطاقة التي امتصتها على هيئة إشعاع يكون في بعض الأحيان في مجال الضوء المرئي، وفي البعض الآخر يكون على هيئة إشعاع غير مرئي (انظر الشكل 1)، وأيا كانت الحالة فإن الإشعاع المنطلق هذا يُسمى طيف الانبعاث، وإذا مر هذا الطيف خلال منشور أو محزوز الحيود لمطياف فإنه يتحلل إلى مكوناته من موجات.



شكل (1) : انبعاث الفوتون عند عودة الذرات من حالة الإثارة إلى حالة الاستقرار .

هناك نوعان من طيف الانبعاث هما: الطيف المستمر وغير المستمر « الطيف المتقطع»:

1 - **الطيف المستمر**: يتكون الطيف المستمر من حزمة غير متقطعة من ألوان وأطوال جميع الموجات المرئية، وذلك مثل الطيف الذي تعطيه غالب المواد الصلبة عند درجات حرارة عالية. فلا يمكن تحديد عدم غياب لون فراغات داكنة عند تحليل الضوء بالمطياف. ويمكن استخدام العناصر والمركبات ذات درجات الانصهار العالية كمصادر ملائمة للطيف المستمر فيستخدم التنجستن في المصباح الكهربائي للإضاءة ليلًا.

2 - **الطيف المتقطع**: يتكون طيف الإصدار غير المستمر لمادة من نمط لخطوط مضيئة على أرضية داكنة ويُسمى بخط الطيف المرئي أو الطيف الخطي. وقد أدى هذا إلى اكتشاف بعض العناصر، من ذلك مثلًا الريبديوم والسيزيوم والثاليوم والإنديوم والجاليوم والأسكنديوم؛ وذلك لأن بعض المواد الخام أعطت عندما فحصت بواسطة المطياف خطوطًا لا تشبه خطوط العناصر المعروفة في ذلك الوقت. كما أن طيف الانبعاث أدى إلى اكتشاف غاز الهليوم في الشمس عام 1868، ولم يعرف وجوده في الأرض إلا في عام 1895.

الهدف الأساسي للتحليل الطيفي الذري هو تحديد العناصر وتحديد كم تركيزها في الأوساط المختلفة. إجراءات التحليل الطيفي تتكون من ثلاث خطوات عامة: تكوين الذرة والإثارة، والانبعاثات. قبل الإثارة، يجب فصل عنصر مرتبط في مصفوفة محددة من هذه المصفوفة حيث أطياف الانبعاث الذري لها خالية من التدخل. التحليل الطيفي للأشعة فوق البنفسجية والمرئية، يجب أن تكون طاقة الإدخال كافية لرفع إلكترون من المستوى الأرضي إلى مستوى الإثارة. فور عودة الإلكترون من مستوى الإثارة إلى سيرته الأولى ينبعث الضوء (الإشعاع الكهرومغناطيسي) من الذرة، الذي له سمة هذا العنصر بالذات.

مصدر الانبعاث الذري المثالي له الخصائص التالية:

1- إتمام إزالة العينة من المصفوفة الأصلية للتقليل من التدخل.

2- التذرية التامة مع مراعاة الحد الأدنى من التأين لجميع العناصر وتحليلها.

3- مصادر الطاقة يمكن التحكم فيها للإثارة، مما يسمح بالطاقة المناسبة اللازمة التي تثير جميع العناصر دون تأين ملموس.

4- البيئة الكيميائية خاملة، التي تمنع تكوين الأنواع الجزئية غير المرغوب فيها (مثل الأكسدة، والكربدة، إلخ) التي تؤثر على دقة القياس.

5- عدم وجود خلفية إشعاعية من المصدر. ويعرف إشعاع الخلفية بالانبعاث الذري أو الجزيئية غير المرغوب فيها التي يمكن أن تتداخل مع الأطوال الموجية التحليلية.

6- المصدر يمكن أن يستخدم مع مجموعة من المذيبات العضوية وغير العضوية في الطبيعة على حد سواء.

7- المصدر قابل للتعديل لمعالجة المواد الصلبة أو السوائل أو الغازات.

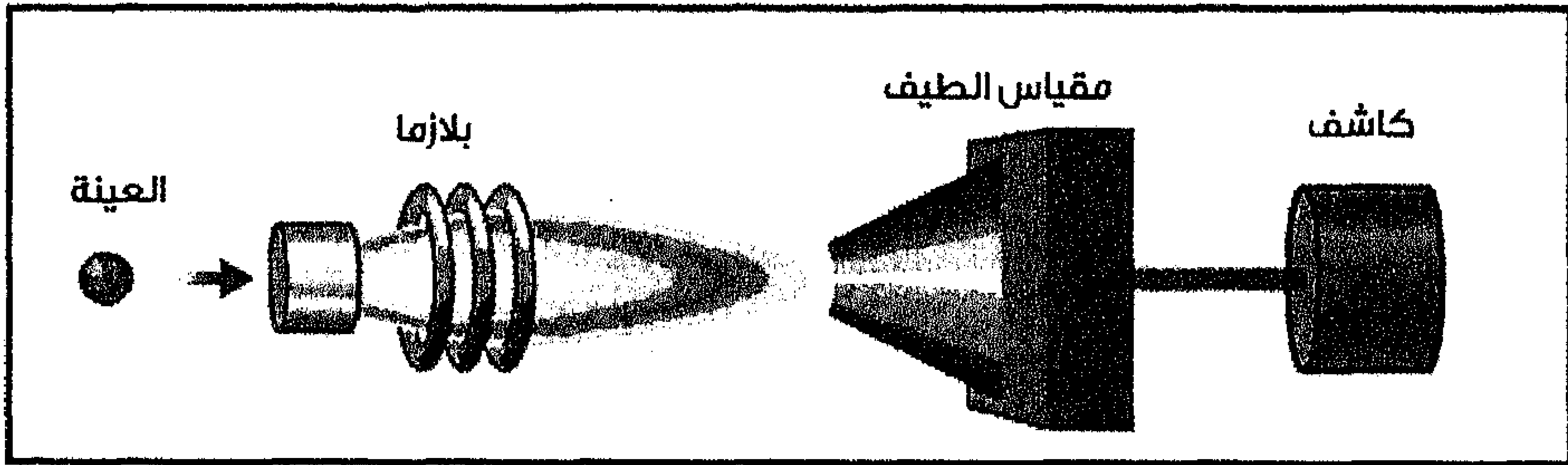
8- غير مكلف لشرائه وصيانته.

9- سهولة التشغيل.

البلازما المقترنة بالحث ذات الانبعاث الطيفي:

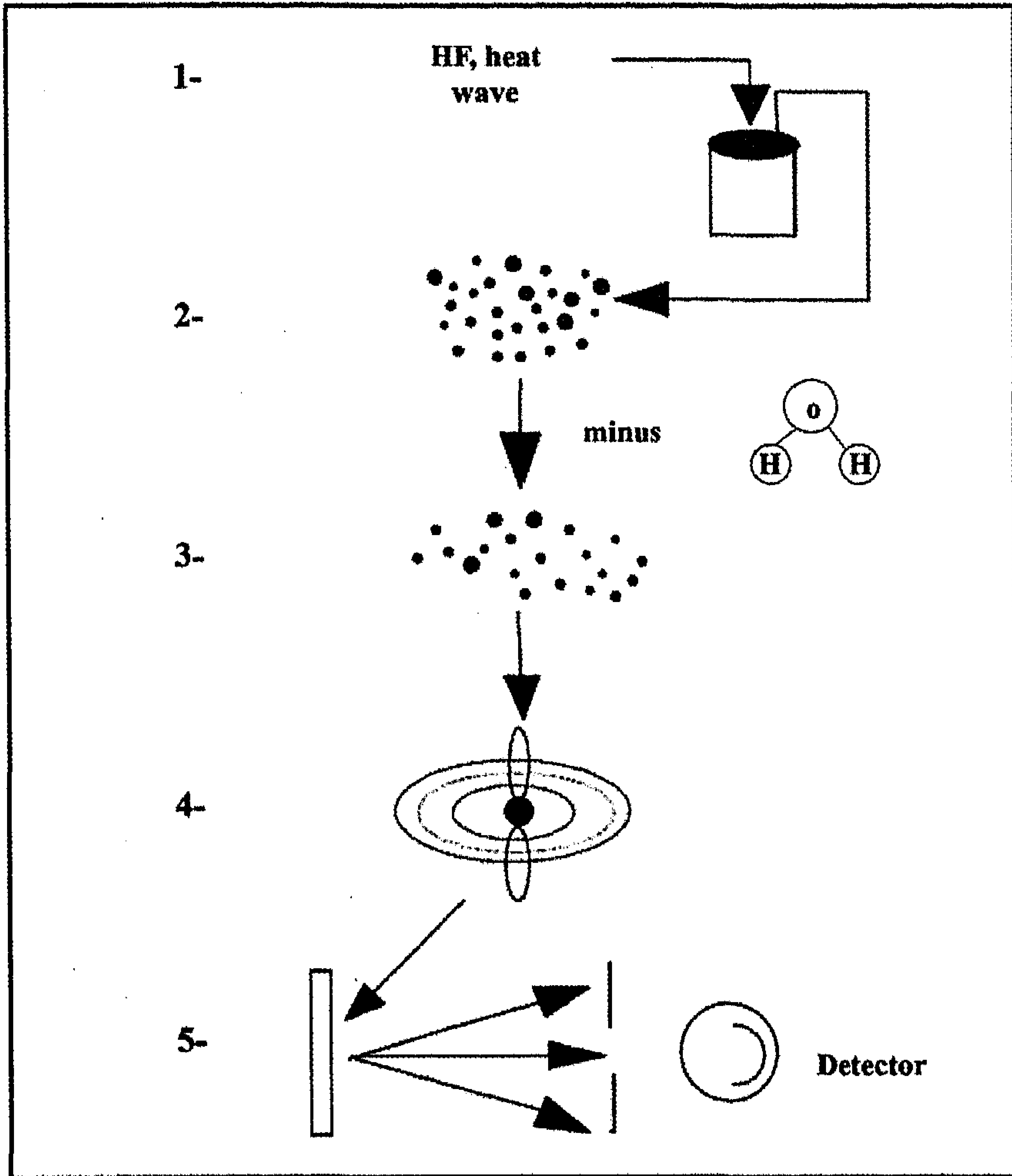
البلازما المقترنة بالحث ذات الانبعاث الطيفي (ICP-AES) أحد الأساليب المتعددة المتاحة في التحليل الطيفي الذري. حيث تستخدم البلازما كمصدر للتذرية والإثارة. البلازما هي غاز محايد كهربيا، والغاز عالي التأين يتكون من الأيونات والإلكترونات والذرات. ومن أمثلة البلازما الموجودة في الطبيعة الشمس والبرق والشفق الشمالي (الأضواء القطبية الشمالية). الطاقة التي تحفظ البلازما مشتقة من المجال الكهربائي أو

المجال المغناطيسي. معظم البلازما التحليلية تعمل بالأرجون النقي أو الهليوم، مما يجعل الاحتراق مستحيلا. تتميز البلازما بدرجة الحرارة، فضلا عن كثافة الإلكترونات والأيونات. عادة درجة حرارة البلازما التحليلية تتراوح بين 8000 و 600 درجة كلفن. بالمقارنة، مع درجة الحرارة الداخلية لباطن الشمس تبلغ ملايين الدرجات، بينما درجة الحرارة السطحية لها تقريبا 10000 k. الرسم التخطيطي للبلازما المقترنة بالحث ذات الانبعاث الطيفي (ICP-AES) موضح في الشكل (2).



شكل (2): رسم توضيحي لنظام البلازما المقترنة حثيا.

الشكل (3) يوجز الخطوات التي تنطوي عليها في تحديد المحتوى العنصري لعينة المرحلة المائية بنظام البلازما المقترنة بالحث ذات الانبعاث الطيفي.



شكل (3): 1- إعداد العينة: تتطلب بعض العينات خطوات الإعداد الخاصة المشتملة على المعالجة مع الأحماض والتدفئة والموجات الدقيقة 2- التذرية: تحويل السائل إلى رذاذ 3- تطاير: انطلاق المياه، ويتم تحويل الأجزاء الصلبة والسائلة المتبقية إلى غازات 4- ترذيذ: كسر الروابط لطور الغاز، ووجود الذرات فقط. درجة حرارة البلازما والبيئة الكيميائية الخاملة مهمان في هذه المرحلة. 5. الإثارة/ الانبعاثات: تحصل الذرات على الطاقة من التصادم وينبعث الضوء بالطول الموجي المميز. 6- فصل/ الكشف: محزوز الحيود يشتت الضوء ويتم الكشف عنه.

مقارنة التقنيات المستخدمة في التحليل الطيفي الذري:

الجدول (1) يبين المقارنة بين ملامح التقنيات الشائعة المستخدمة للتحليل الطيفي الذري. هذه التقنيات تنتمي إلى فئة من الفئات الثلاث: ألسنة اللهب والأفران (الكهروحرارية) والبلازما. كل تقنية لها مزايا وعيوب في الأداء والبراعة والسعر. تجدر الإشارة إلى أن معظم البارامترات ستختلف مع النموذج، والسنة، والمشغل، وظروف التشغيل، والمصفوفة، إلخ. ينبغي النظر في القيم المعطاة لمعظم البارامترات واعتبارها كنموذج.

جدول 1: ملخص للتقنيات الشائعة المستخدمة في التحليل الطيفي الذري:

	ICP[1]	FAA[2]	GFAA[3]	MIP[4]	Arc[5]
Temp (K)	4000-8000	1500-2500	2000	1000-2000	3000-8000
e^-/cm^3	5×10^{14}	$3\text{-}9\times13^{13}$		7×10^{13}	$10^{14}\text{-}10^{15}$
gas	argon	air/acetylene	argon	helium	argon
LOD (conc)[6]	2ppb	10ppb	0.1ppb		8ppb
LOD (mass)[7]	4ng	20ng	5ng		16ng
SME[8]	ME	SE	SE	ME	ME
Heating Method	Induction	combustion	voltage across graphite tube	magnetron	voltage across graphite tube
λ Range[9]	120-900	190-900	190-900	190-900	190-900
Range[10]	4-6	3-4	2-3	3-4	3-4
AA source		HCL	HCL		
Common Application	ppb of numerous metals in solution	ppm of 1metal (high volume)	Single element low volume (ppb, pg)	halogens (Cl, Br, etc)	Replaced by ICP
Price[11]	$100.000	$35.000	$55.000	$65.000	

Sample size	Flow (mL)	Flow (mL)	Static (µL)	Flow (mL)	Flow (mL)
Interfer	argon emis[13]	molecul[14]	molecul.,	He emis[16]	elect[17]
Instrum	contin		scatter[15]	contim	Ar emis.,
System[12]					contin
Frequency	27.12, 40MHz			2450MHz	DC
Power	1-2kW			0.2-1kW	<100W

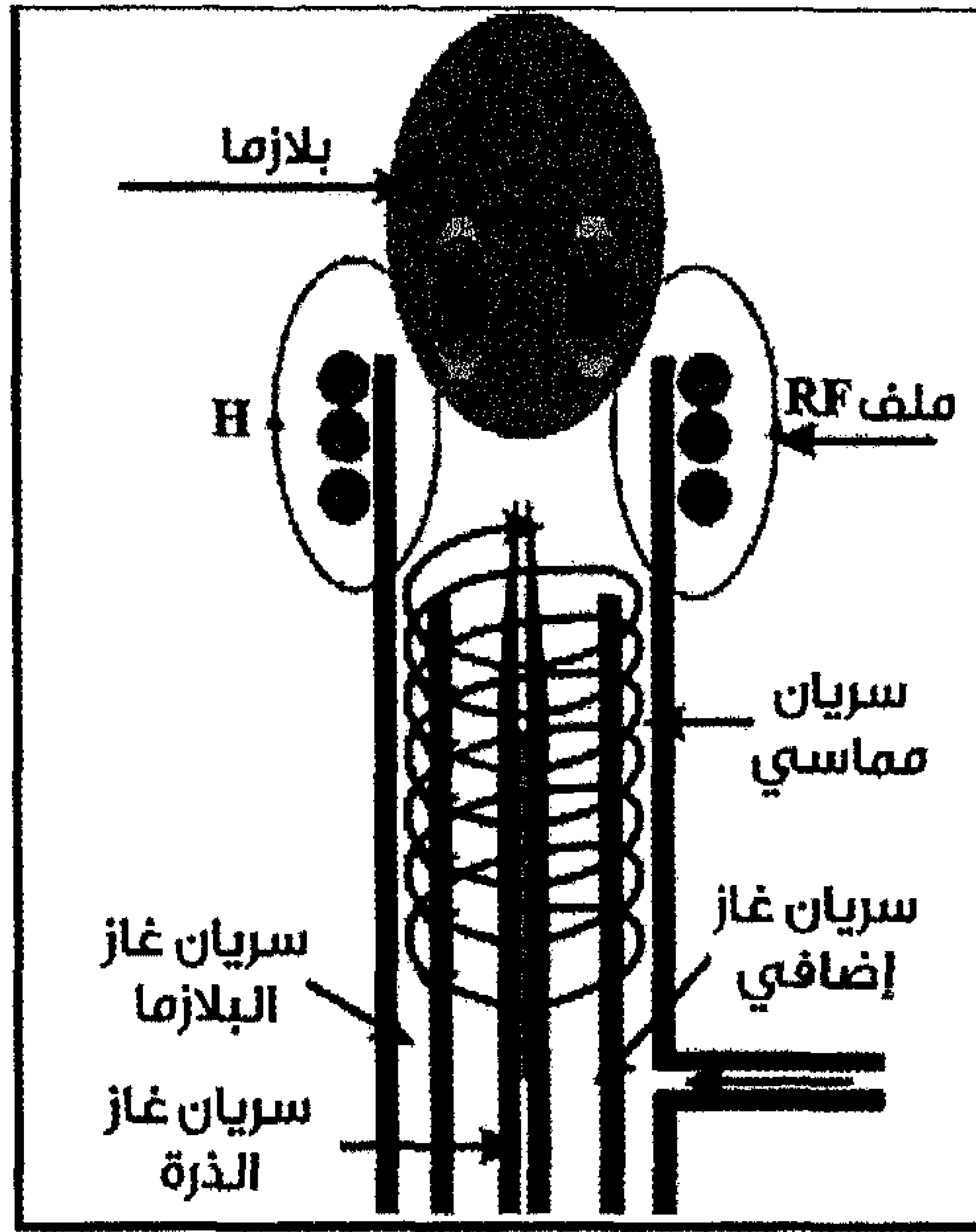
- Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer.
- Flame Atomic Absorption.
- Graphite Furnace Atomic Absorption.
- Microwave Induced Plasma.
- DC plasma arc.
- The limit of detection for iron by concentration (MIP-AES is used primarily for nonmetals).
- The limit of detection for iron by absolute mass (for ICP، FAA, DCP assumes 2 mL volume, GFAA assumes 50 uL).
- Single or multielement analysis possible on a single sample. For example a commercial ICP can simultaneously detect 20 elements but a graphite furnace atomic absorption system is only capable of single element detection with a single «shot".
- The linear dynamic range (orders of magnitude).
- The wavelength range of the technique. These values can vary with sources، dispersing element، and detector chosen.
- Varies with vendor، model، accessories، etc.
- Interferences from instrumental system.
- Ar emission; continuum background.
- Molecular emission; absorbance from gas species (e.g. C.، N.، etc.).
- Scattering from particulate matter.
- Helium emission.
- Electrode degradation (e.g.,W, WC, emission etc.)

مشعل البلازما بالحث (Torch):

تستخدم الموجات اللاسلكيةRF (27.12 ميجاهرتز، 40 ميجاهرتز) لإنتاج البلازما المقترنة بالحث ICP الناجمة عن استخدام الملف الحثي لإنتاج مجال مغناطيسي (H). ويعمل جهاز البلازما بالحث بين 1 و 5 كيلو وات. يتم التغليف بالملف الحثي (اثنتين أو ثلاث مرات) حول مشعل البلازما والمياه المتدفقة من خلاله بغرض التبريد. جميع أنظمة ICPs تملك المكثف الذي يتم ضبطه باستمرار لمطابقة حاثة البلازما. من أجل تحرك الترددات اللاسلكية على طول سطح الملف الأجوف بأقل مقاومة، يطلى الملف سواء بالذهب أو الفضة. الذهب أو الفضة لا يشكلان أكاسيد معدنية عند ملامسة الهواء. على الرغم من أن إمدادات الطاقة RF تحفظ البلازما، يستخدم اللولب تسلا لإشعال البلازما من خلال توليد الإلكترونات والأيونات التي تقترن مع المجال المغناطيسي.

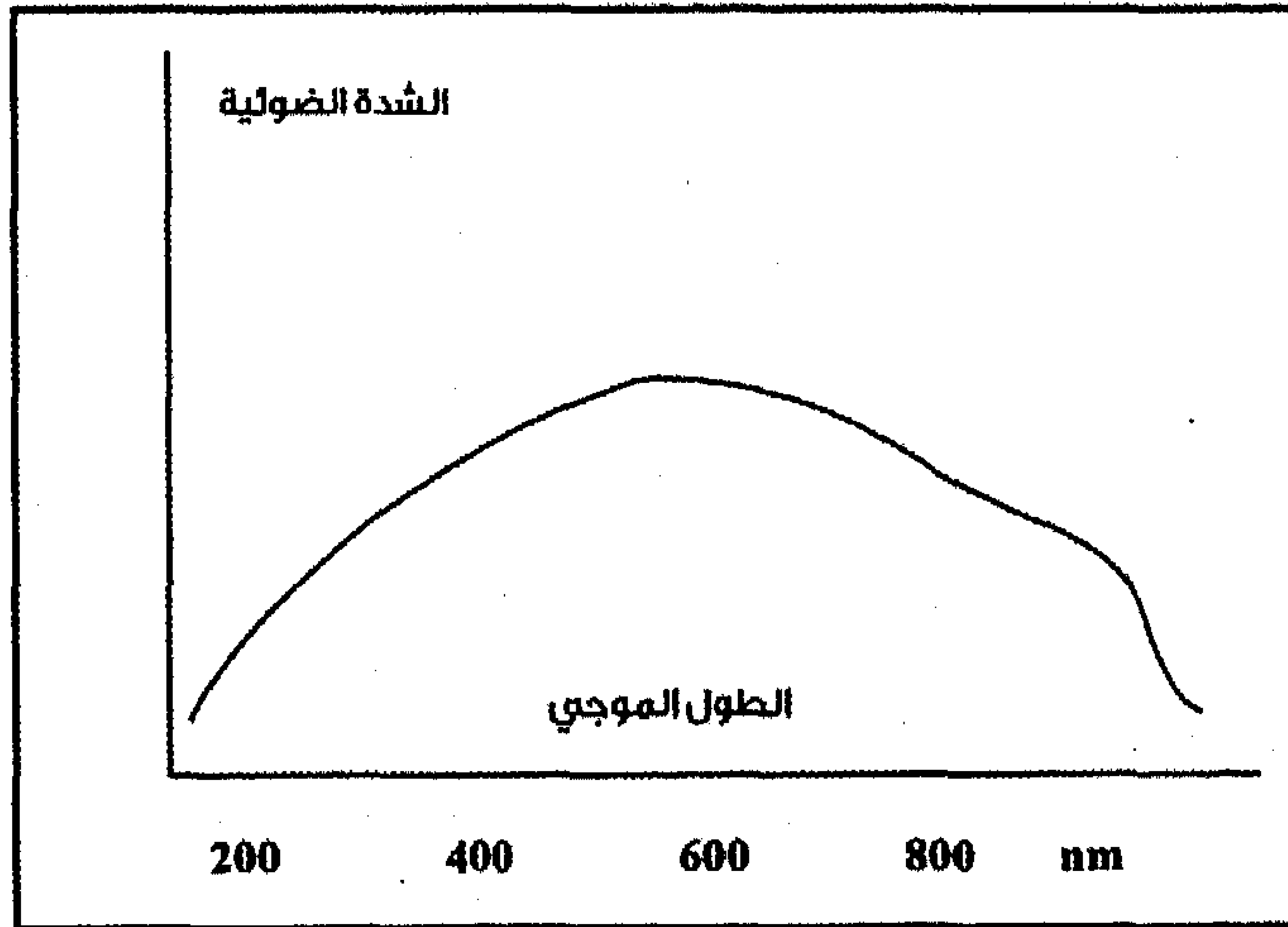
الشعلة ICP:

الشعلة ICP الأكثر شيوعًا في الاستخدام اليوم تطورت على مدى عقود موضحة بالشكل (4). الأنبوب مصنوع من الكوارتز الدائري (القطر الخارجي يتراوح بين 12 و30 مم)، يوجد ثلاثة مداخل للغاز منفصلة. الغاز الوحيد الذي يستخدم بشكل روتيني هو الأرجون. ويدخل غاز البلازما من خلال قناة خارجية بمعدل تدفق عرضي قدره 8–20 لترًا/ دقيقة. الغاز المساعد، الذي يعبر القناة المركزية، أيضا يتدفق بنمط عرضي (0.5 - 3 لتر/ دقيقة). الغاز المذري له نمط التدفق الطبقي (0.1 إلى 1.0 لتر/ دقيقة) ويقحم العينة في البلازما. المنطقة التحليلية أعلى اللفات بمقدار1 سم تقريبا وتقدم أفضل مساحة رؤية لأقصى حساسية. درجة حرارة البلازما في المنطقة التحليلية تتراوح بين 5000 و 8000 كلفن (درجة الحرارة تتغير مع الطاقة، ومعدل التدفق، إلخ). الارتفاع في درجة الحرارة يؤكد أن معظم العينات مُذرية (atomized) تماما، على الرغم من أن بعض الأنواع الجزيئية (مثلًا، N_2، N_2^+، أوOH، C_2، إلخ) موجودة بالفعل ويمكن قياسها بسهولة في البلازما.



شكل (4): رسم توضيحي لمشعل ICP

البلازما تنبعث منها سلسلة متصلة من الخلفية الإشعاعية التي تمتد من منطقة الضوء المرئي إلى المنطقة فوق البنفسجية (انظر الشكل 5). الإشعاع ينشأ من الإلكترونات، الأرجون وأيون الأرجون بالإضافة إلى مختلف الأنواع الذرية والجزيئية في المصفوفة.



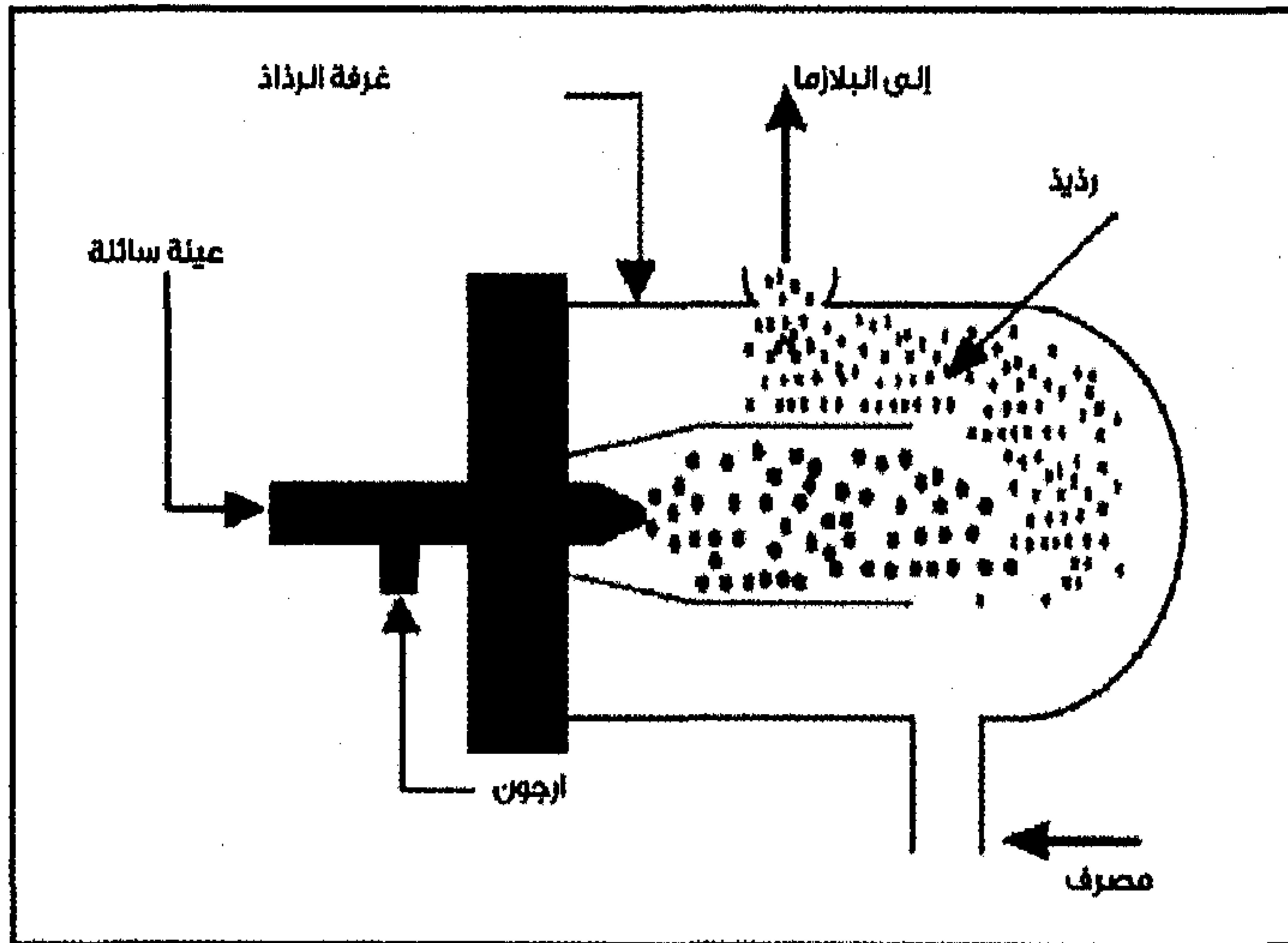
شكل (5): الشدة الضوئية (I) لبلازما الأرجون مقابل الطول الموجي المنبعث.

دخول العينة:

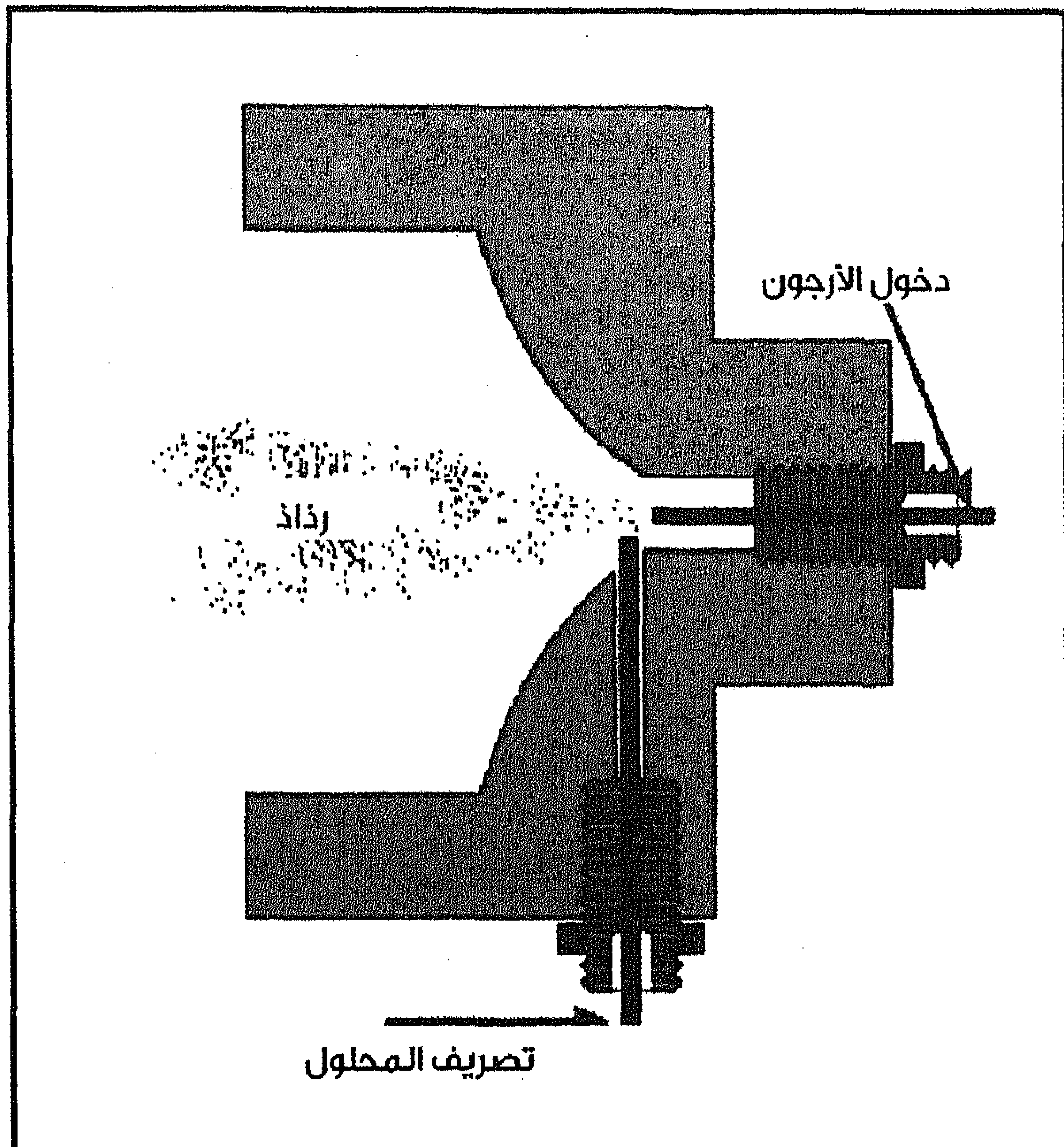
الحالات الثلاثة (الغاز، السائل، الصلب) يمكن إدخالها بسهولة في جهاز البلازما المقترنة بالحث ICP بغرض التعرف على عناصرها. على الرغم من أن كلا المذيبات المائية وغير المائية على حد سواء تم استخدامها، إلا أن العينة التي تم تحليلها والأكثر شيوعًا هي الكاتيونات (الأيونات الموجبة الشحنة) في المحلول. للمحاليل، يستخدم المذرة لتحويل تيار السائل إلى الرذاذ الجوي الذي يتألف من الجزيئات والتي يتراوح قطرها بين 1 و 10 ميكرومتر. الحقن المباشر للسوائل في البلازما قد يسبب إطفاء للبلازما، مما يجعل الإثارة والانبعاث أقل كفاءة. وترد أدناه مناقشة خمسة أجهزة مشتركة في إدخال عينة من عينات المحاليل.

مذرة (Pneumatic) بالهواء المضغوط:

الشكلان (6 و 7) يوضحان نوعين من المذراة التي تعمل بالهواء المضغوط، وهما الأنواع الأكثر شيوعًا في الاستخدام اليوم. في الشكل (6) عينة المحلول تسحب عن طريق أنبوبة شعرية بتدفق الغاز المذري (ما يسمى بتأثير برنولي Bernoulli).



شكل (6): مذرة الهواء المضغوط التي تستخدم تأثير برنولي لامتصاص العينة.



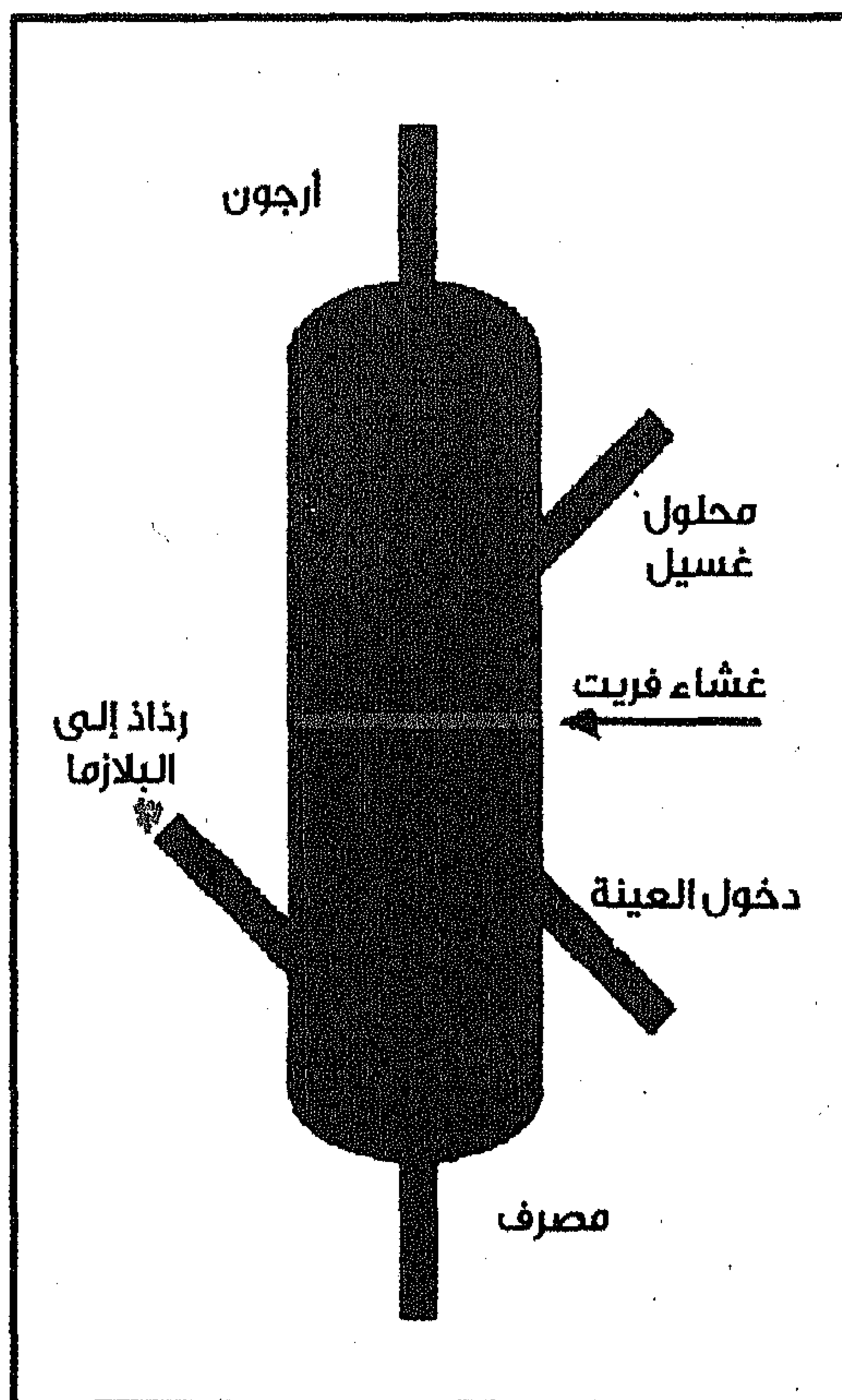
شكل (7): مذرة الهواء المضغوط حيث ترتبط العينة بالغاز المذري لتكوين الأيروسول.

يتم فصل الرذاذ المتولد في غرفة الرش بحجم قطرات أصغر تنقل إلى البلازما وتستنزف القطرات الأكبر. في الشكل (7) ضم العينة والغازات المذرة في زاوية عمودية، تتسبب في تشكيل الرذاذ للعينة، الذي يضرب بعد ذلك حبة الارتطام (لا تظهر في الشكل). حبة الارتطام تتسبب في تمزق القطرات للخروج عن بعضها البعض.

مذرة فريت (Frit):

ويوضح الشكل (8) مذرة فريت-الزجاجي. يتم ضخ عينة المحلول إلى غشاء الفريت، الذي يتألف من مادة طبيعية مليئة بالثغرات في نسيج شبيه بالشعاب المرجانية.

الأرجون يمر عبر الغشاء ويسبب للعينة لتشكل رش الرذاذ. مذرات الفريت تتمتع بكفاءة عالية تصل إلى 90 ٪ مع سحب الفائض من العينة. النظام مجهز بمنفذ محلول غسيل لتنظيف غشاء الفريت وتفادي تأثير الذاكرة.

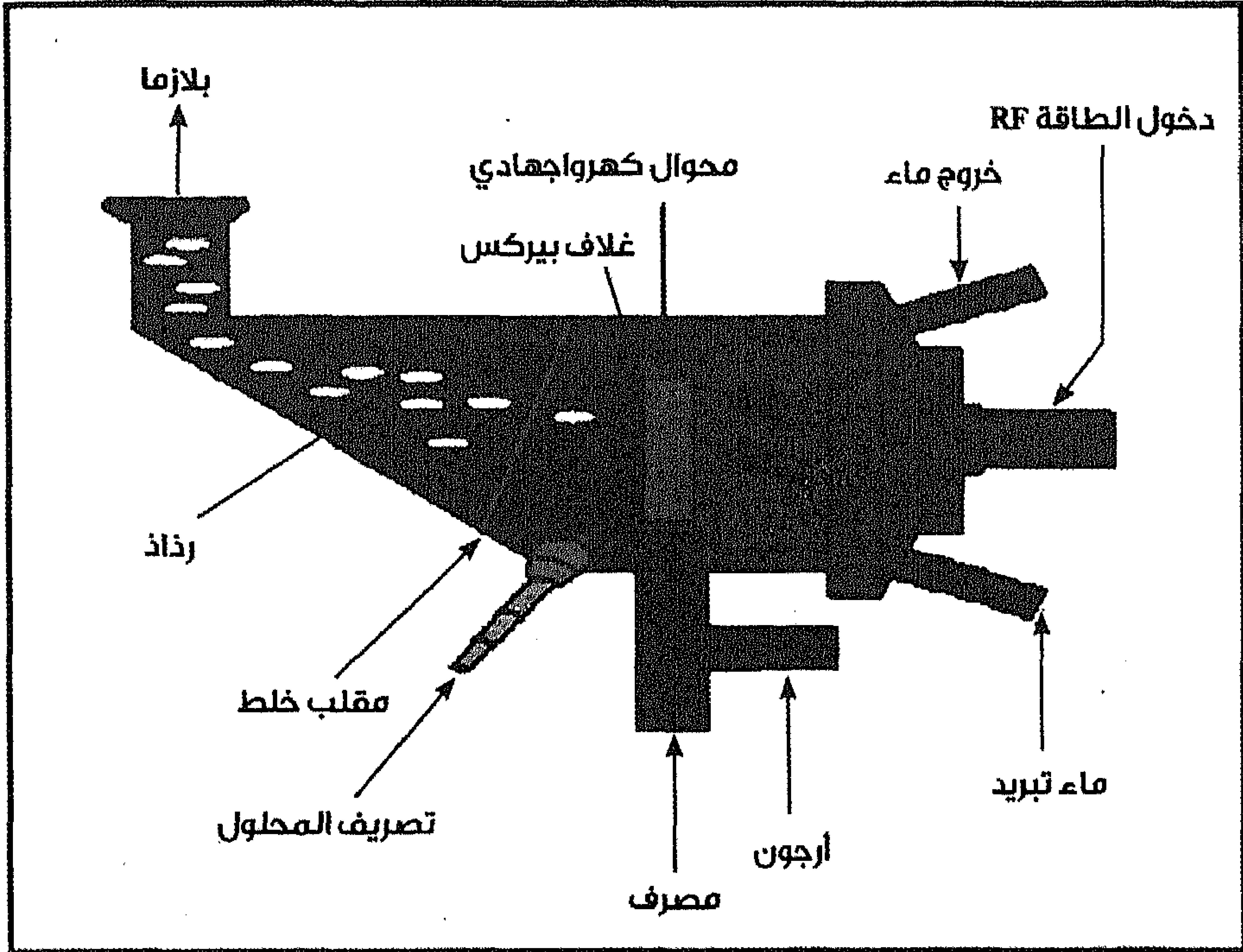


شكل (8): رسم توضيحي لمذرة فريت

مذرة فوق صوتية (Ultrasonic):

الشكل (9) يوضح مذرة تعمل بالموجات فوق الصوتية. في هذا الجهاز، بلورة كهرواجهادي(piezelectric) تتذبذب بترددات الموجات فوق الصوتية (50 كيلو هرتز إلى 4 ميجا هرتز)، ويتم ضخ العينة إلى البلورة من خلال أنبوب بلاستيكي صغير. تسبب

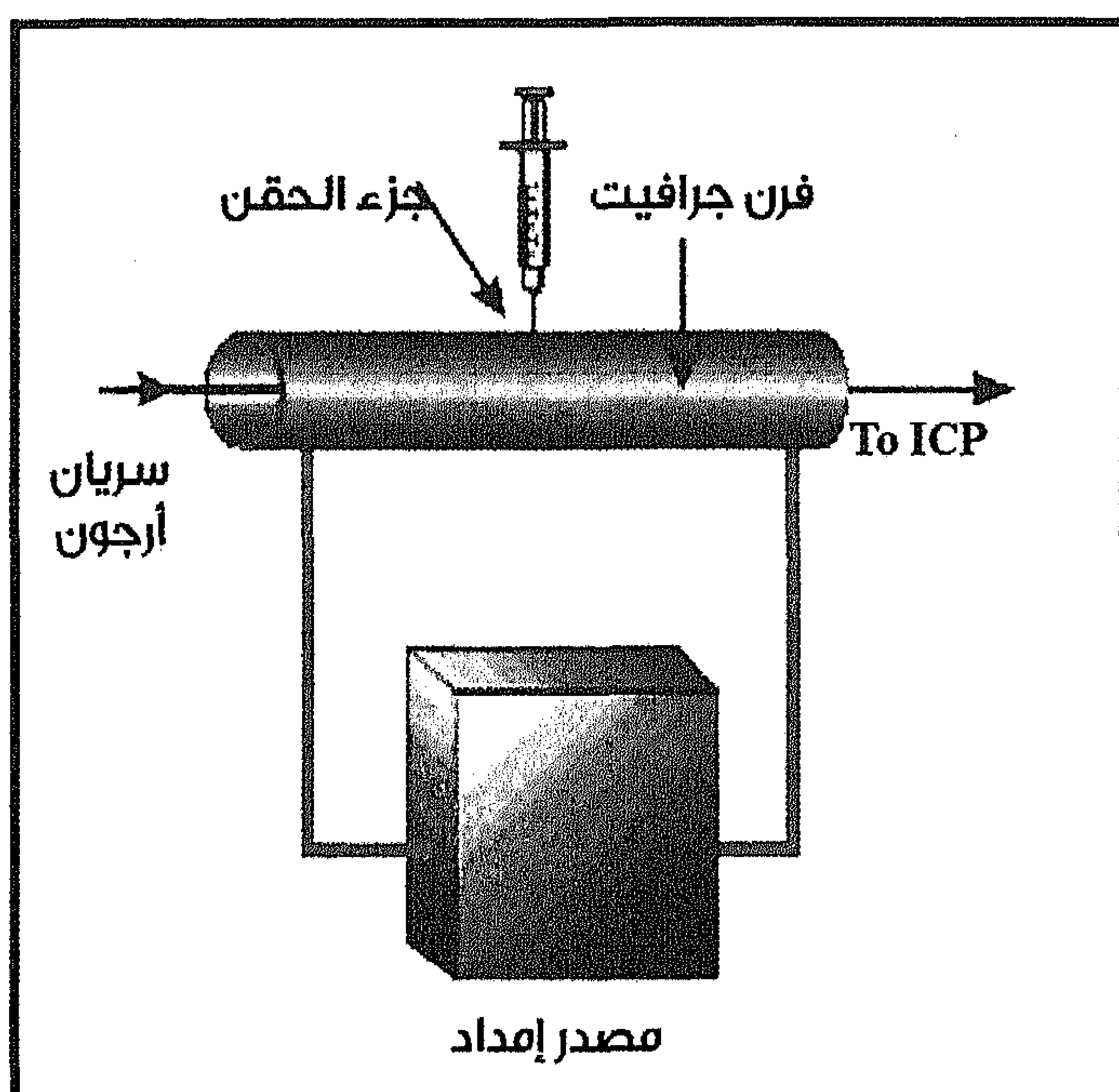
اهتزازات البلورات لتكسير القطيرات إلى جزيئات أصغر، التي تنقل إلى البلازما. تسحب قطرات الرذاذ الكبيرة.



شكل (9): رسم توضيحي لمذرة فوق صوتية

المبخر الكهروحراري:

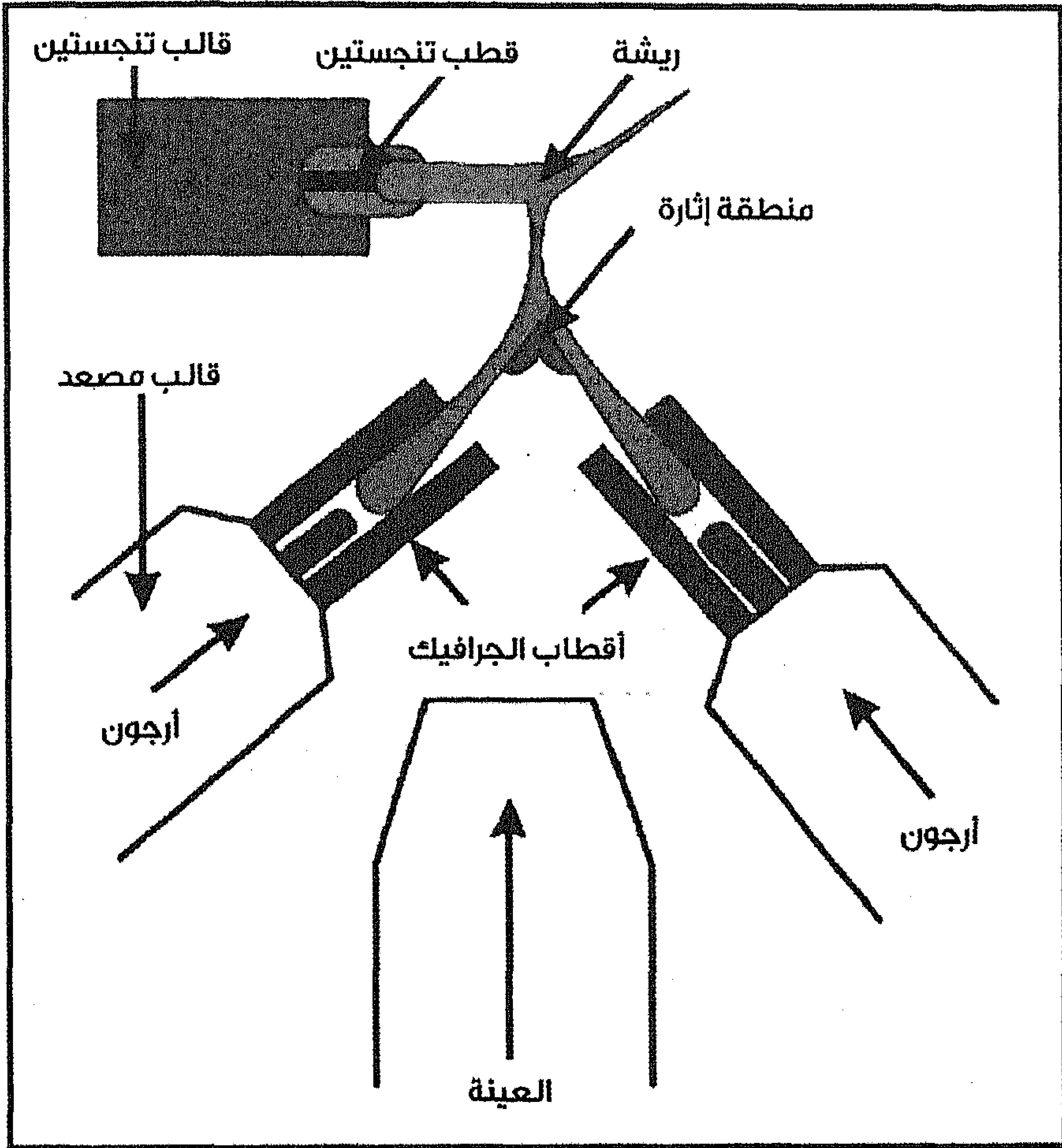
التبخير الكهروحراري، الذي يتجلى في الشكل (9)، يستخدم للعينات الصلبة والسائلة على حد سواء. للسوائل بكمية محدودة (5–50 ميكرولتر) توضع في فرن جرافيت، الذي يتم بعد ذلك تسخينه كهربائيًا. يتم إرسال العينة المبخرة الناتجة عن ذلك إلى البلازما للتحليل. درجة الحرارة في العينة تنحدر من درجة حرارة منخفضة نسبيا (مثل 110 درجة سيلزيوس) تدفع بالعينة قبالة المذيب، إلى درجة حرارة أعلى (مثلًا 2000 درجة سيلزيوس) تتسبب في تبخير الصلب المتبقي من العينة.



شكل (10): المبخر الكهروحراري

مولد الهيدريد Hydride Generator:

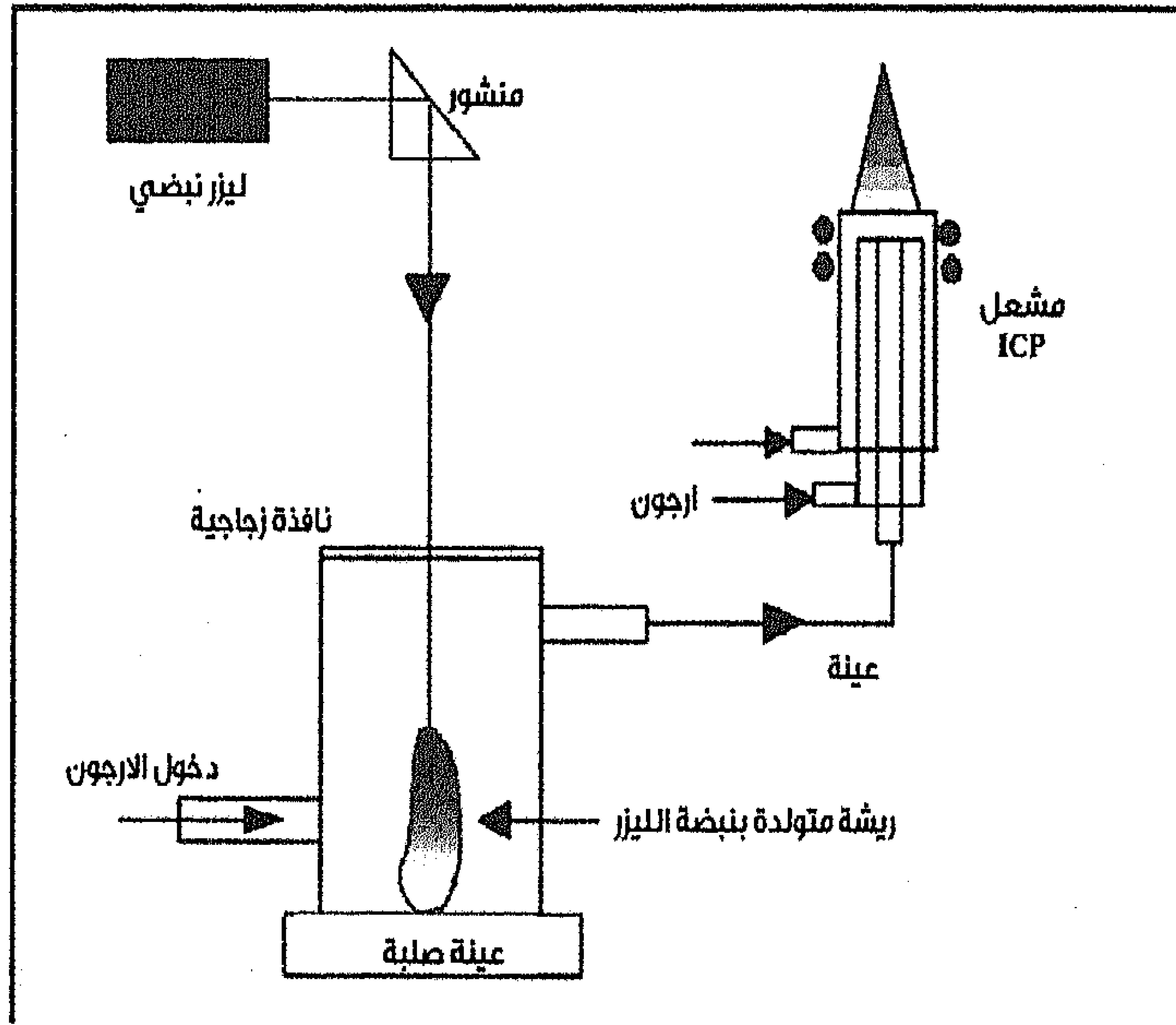
أشباه الفلزات والمعادن اللينة (مثلا As Se Sb Sn) يمكن إدخالها إلى البلازما ICP في صورة هيدريد متطايرة تتكون بتفاعل عنصر المصلحة مع بورهيدريد الصوديوم (NaBH4). يتم نقل الهيدريد الغازي إلى البلازما للتحليل. تحليل المواد الصلبة بالانبعاث الطيفي للبلازما الحثية حقل يتوسع بسرعة. يمكن تحليل العينات التي تتراوح بين طين سائل لزج وقطع من سبائك. يتم إدخال المواد الصلبة في البلازما مباشرة أو بعد التبخر الكهروحراري، التبخير الناتج عن القوس الكهربي، أو استئصال الليزر. للإدراج المباشر، يتم استخدام مجس مع كمية محدودة من العينة على الحافة به لتقديم العينة في البلازما. في حالة القوس الكهربي ذات التيار المستمر (DC)، التي تتجلى في الشكل (11). كمية صغيرة من العينة الصلبة تحمل على الكترود وتبخر بتيار كهربائي قبل نقلها إلى البلازما ICP.



شكل (11): جهاز قوس التيار المستمر

استئصال الليزر المباشر الموضح بالشكل (12) يستخدم الليزر النبضي لتبخير العينة الصلبة. ويتم حمل الريشة plume بغاز الأرجون إلى مشعل البلازما ICP للتحليل بالانبعاث الطيفي.

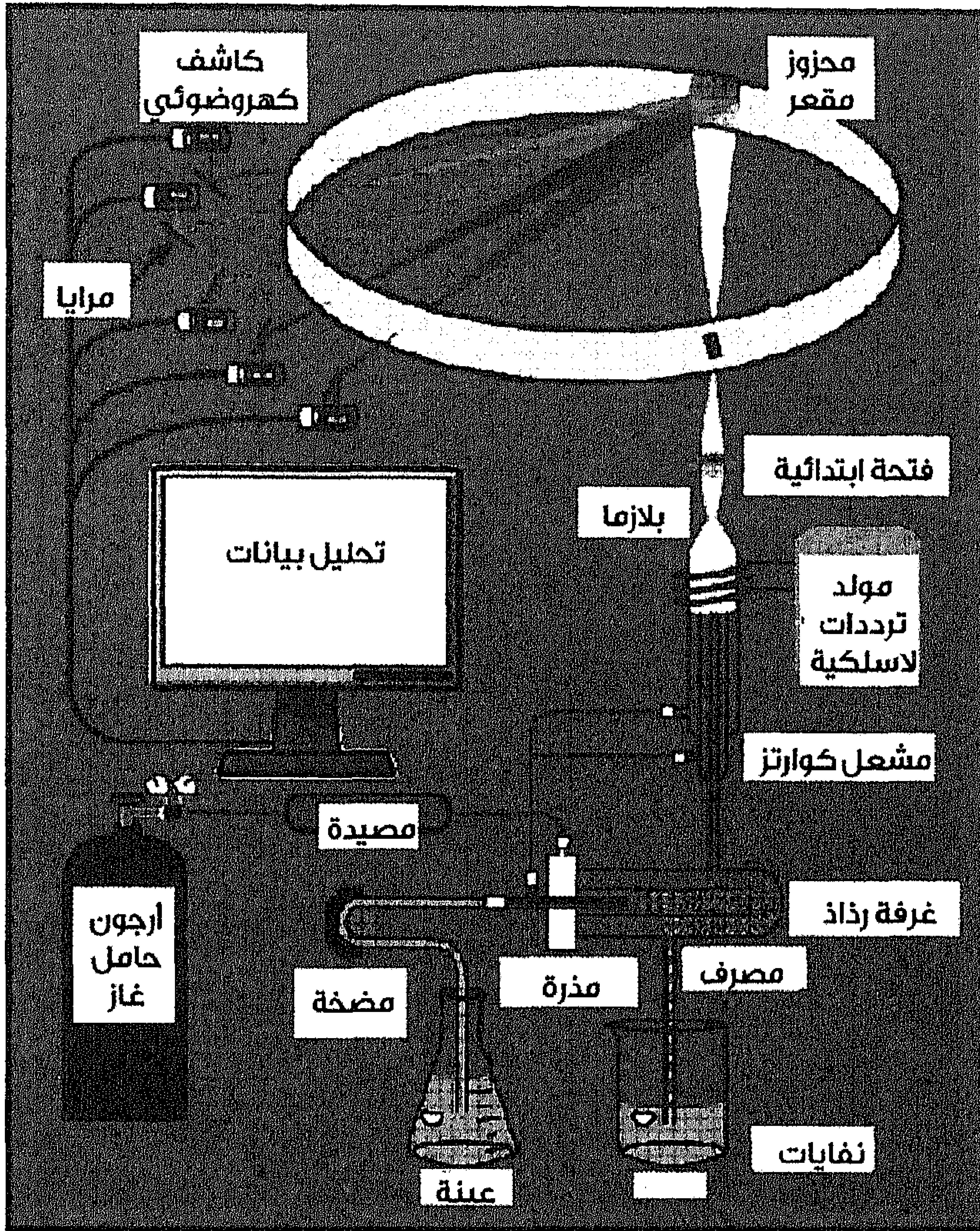
ريشة الليزر يتم إنشاؤها في بيئة خاملة للتقليل إلى الحد الأدنى من الاحتراق أو تكوين أكسيد المعدن.



شكل (12): إدخال العينة باستئصال الليزر

التشتت وأساليب الكشف:

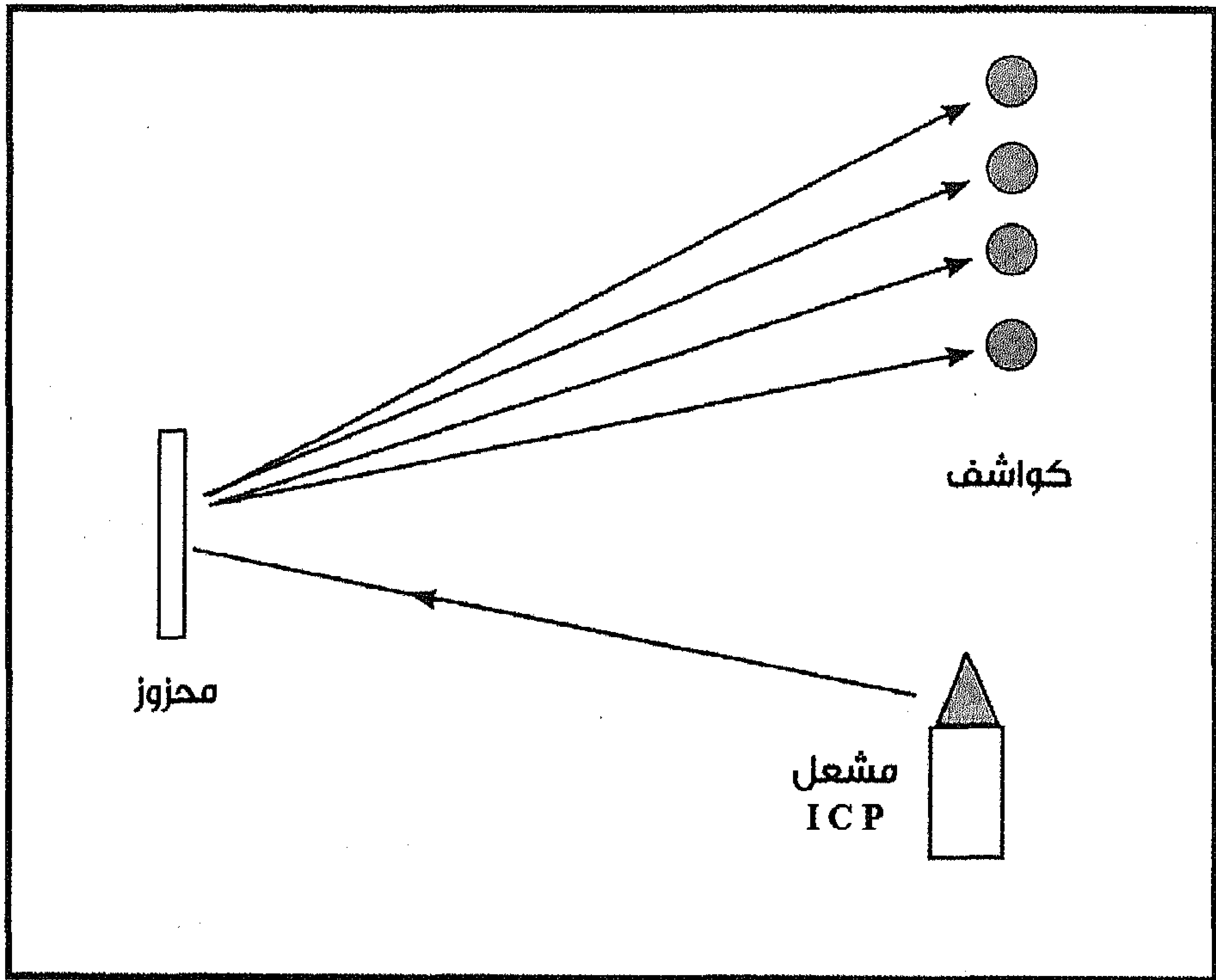
يوجد ثلاثة أجهزة شائعة تستخدم لفصل أو تشتت الضوء: المنشورات، ومحزوز الحيود، ومقياس التداخل لميكلسون. هناك ثلاثة أنواع أساسية من نظم الكواشف: أنابيب المضاعف الضوئي (PMTs) ومصفوفة الثنائي الضوئي (PDAs) وأجهزة نبطية اقتران الشحنات (CCDs). عادة يتم تجميع أجهزة التشتت والكواشف في إحدى الصور الأربعة، التي تختلف من حيث التطور: (1) تسلسلي؛ (2) متزامنة مع الكشف عن نقطة واحدة؛ (3) متزامنة مع كشف أحادي البعد؛ (4) بالتزامن مع الكشف ثنائي الأبعاد. النظم المتسلسلة تستخدم المنشور أو المحزوز والمضاعف الضوئي. هذا التكوين، يتجلى في الشكل (13)، وكثيرًا ما يشار إلى مقياس أحادي اللون monochrometer. تسمح الأنظمة المتتالية بتحليل خط واحد فقط . لمسح منطقة بأكملها من الطيف الكهرومغناطيسي بنظام تسلسلي، يثبت الكاشف في موضع ثابت ويتم تشغيل محزوز الحيود تعاقبيا.



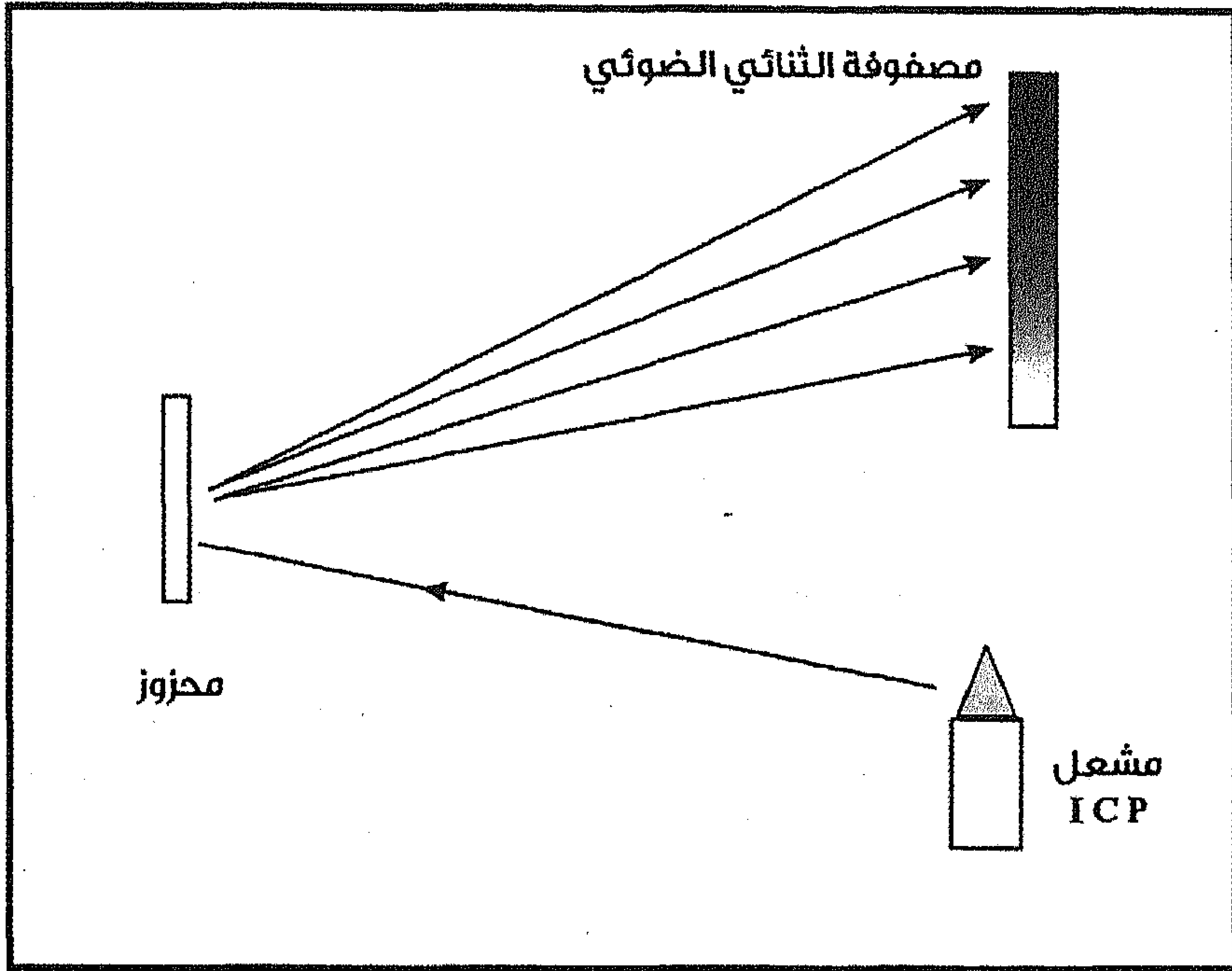
شكل (13): نظام قياس الأطوال الموجية عند مواضع متعددة (مقياس متعدد الألوان)

النظم الأكثر فعالية لقياس أطوال موجية معينة عند مواضع متعددة في وقت واحد، موضحة في الشكل (14). وقدرة هذه الأنظمة تسمى «مقياس متعدد الألوان» (polychrometer) لقياس خط تحليلي واحد أو أكثر، وهو مميز عن مقياس أحادي اللون monochrometer، إلا أنه يعاني من الافتقار إلى المرونة. وهكذا، حالما يتم تعيين نظم

التشتت والكشف، يمكن قياس بعض الخطوط التحليلية والعناصر. الجيل القادم ينطوي على استخدام كاشف الحالة الصلبة ذات البعد الواحد تسمى مصفوفة الثنائي الضوئي (PDA)، الذي يتجلى في الشكل (15)، وهو شبيه بأنبوبة المضاعف الضوئي (PMT) التي تثبت في موضع ثابت، ولكن أجهزة مصفوفة الثنائي الضوئي أصغر حجمًا وأقل تكلفة. نتيجة لذلك، يمكن إدراج كاشفات أكثر في صك واحد. يمكن اقتناء 1024 كاشفًا مصغرًا لقياس الطاقة في وقت واحد في مسافة بوصتين إلى ثلاث بوصات. وهذا يسمح بنوافذ طيفية في نطاق 50 إلى 100 نانو متر تقاس في وقت واحد.



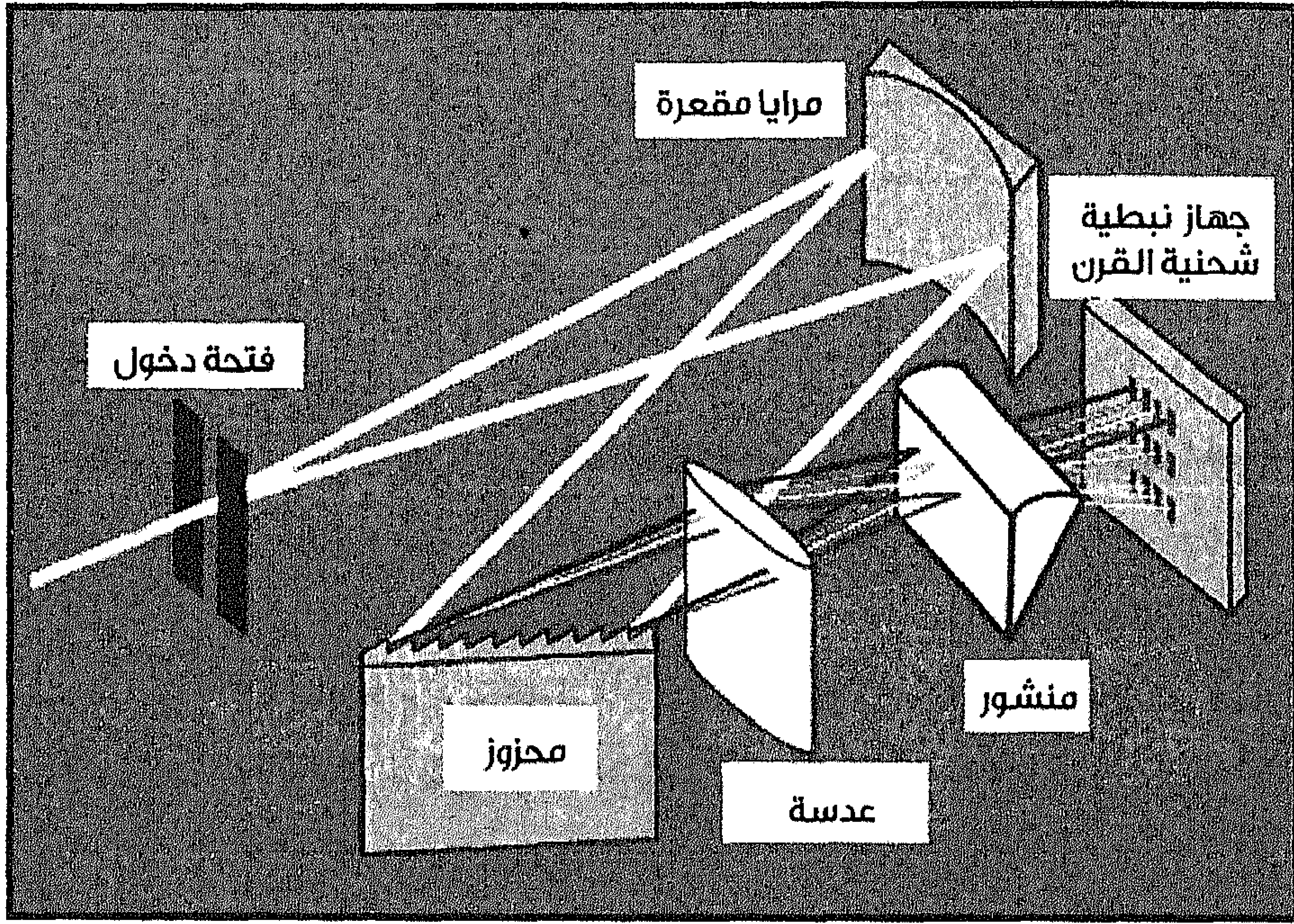
شكل (14): مقياس متعدد الألوان لتحليل الإشعاع في آن واحد



شكل (15): مصفوفة الثنائي الضوئي لتحليل الإشعاع في آن واحد

جهاز نبطية شحنية القرن (CCD) هو امتداد تكنولوجيا كاشف الحالة الصلبة في بعدين (مثلًا 300 من 500 بكسل). الجمع بين المنشور والمحزوز مع جهاز نبطية شحنية القرن (انظر الشكل 16) يسمح بتحليل عنصر متعدد باستخدام أكثر من طول موجي من كل عنصر.

عموما نبطية شحنية القرن تستخدم محزوز الحيود جنبا إلى جنب مع المنشور لتشتيت الإشعاعية الطيفية كدالة في الطاقة ورتبة هذين البعدين.



شكل (16): جهاز نبطية شحنية القرن (CCD)

التداخل:

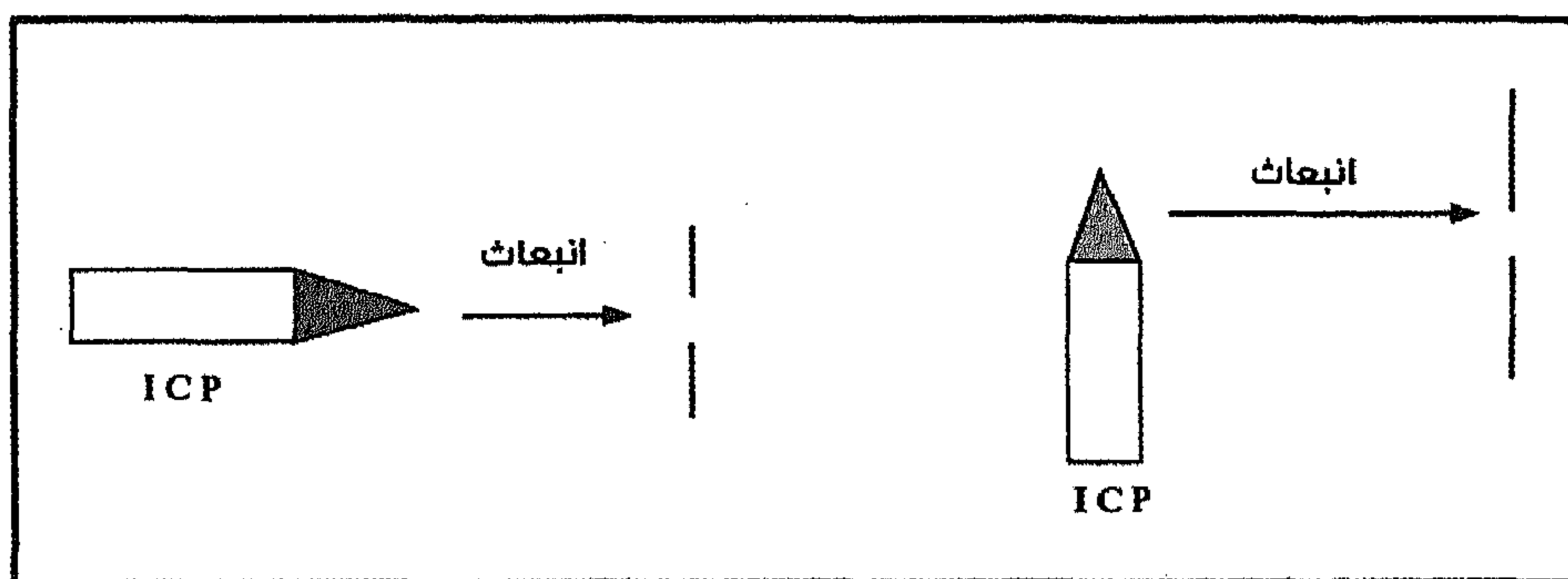
أية عملية كيميائية أو فيزيائية تؤثر سلبا على قياس الإشعاع يمكن أن تصنف باعتبارها تداخلا. التداخلات في أنظمة البلازما المقترنة بالحث ذات الانبعاث الطيفي (ICP-AES) قد تبدأ في مرحلة إعداد نموذج العينة وتمتد إلى ظروف تشغيل البلازما.

ويشمل النوع الأول من التداخل الشائع اثنين أو أكثر من العناصر في مصفوفة الإشعاع المنبعث عند نفس الطول الموجي (على سبيل المثال النحاس عند طول موجي 515.323 نانو متر والأرجون 515.139 نانو متر). يمكن تصغير هذه التداخلات الطيفية باستخدام نظام قدرة تحليل عالي الدقة باستخدام عدة خطوط تحليلية للكشف عن عنصر واحد. والنوع الآخر من التداخل ينطوي على تشكيل العينات غير المرغوب فيها (مثل أيونات، أكاسيد المعادن). على سبيل المثال، بعض المعادن حساسة للغاية للتقلبات

الصغيرة للبلازما من حيث كثافة الذرات المحايدة وكثافة الأيونات. من المهم أن نلاحظ أن ذرة من عنصر معين (مثلًا Fe) له أطياف انبعاث تختلف عن أيونات (مثلًا , Fe^{+2} ، Fe^{+} إلخ). التداخلات الأخرى، مثل تشكيل أكسيدات معدنية أو كربيدات معدنية، يجب أن يتم تقييمها على أساس فردي.

الحساسية:

الجدول (2) يعطي قوائم نموذجية لحدود الكشف لأكثر من 70 عنصرًا تم الحصول عليها. الوحدات بأجزاء لكل بليون (مثلًا نانوجرام/ مللي لتر أو ميكروجرام/ لتر). لا يتم تحليل الغازات الخاملة وبعض اللافلزات البارزة (C, O, H) بالبلازما المقترنة بالحث ذات الانبعاث الطيفي. يوجد نوعان من مشعل البلازما ICP موضحان في الشكل (17)، الجهاز ذو الوضع الأفقي هو الأحدث والأفضل من الوضع التقليدي (الرأسي).



شكل (17): مواضع مشعل الأفقي (اليسار) والرأسي (اليمين)

جدول (2): القوائم النموذجية لحدود الكشف لأهم العناصر بجهاز ICP – AES

Element	LOD	Element	LOD	Element	LOD
Ag	0.9	Hg	1	Sb	10
Al	3	Ho	0.4	Sc	0.2
As	50	1		Se	50
Au	8	In	9	Si	3
B	0.8	Ir	5	Sm	2
Ba	0.09	K	20	Sn	60
Bi	30	Li	0.3	Ta	10
Br		Lu	0.2	Tb	2
C	75	Mg	0.07	Te	10
Ca	0.02	Mn	0.4	Th	
Cd	1	Mo	3	Ti	0.4
Ce	5	Na	3	Ti	30
Cl		Nb	10	Tm	0.6
Co	1	Nc	2	U	15
Cr	2	Ni	5	V	0.5
Cs		Os	6	W	8
Cu	0.4	P	30	Y	0.3
Dy	2	Pb	10	Yb	0.3
Er	1	Pd	3	Zn	1
Eu	0.2	Pr	2	Zr	0.7
F		Pt	10		
Fe	2	Rb	30	He, Ne	
Ga	4	Re	5	Ar	
Gd	0.9	Rh	5	Kr, Xe	
Ge	20	Ru	6	H, O	
Hf	4	S	30	N, C	

LOD = limit of detection

الفصل الخامس

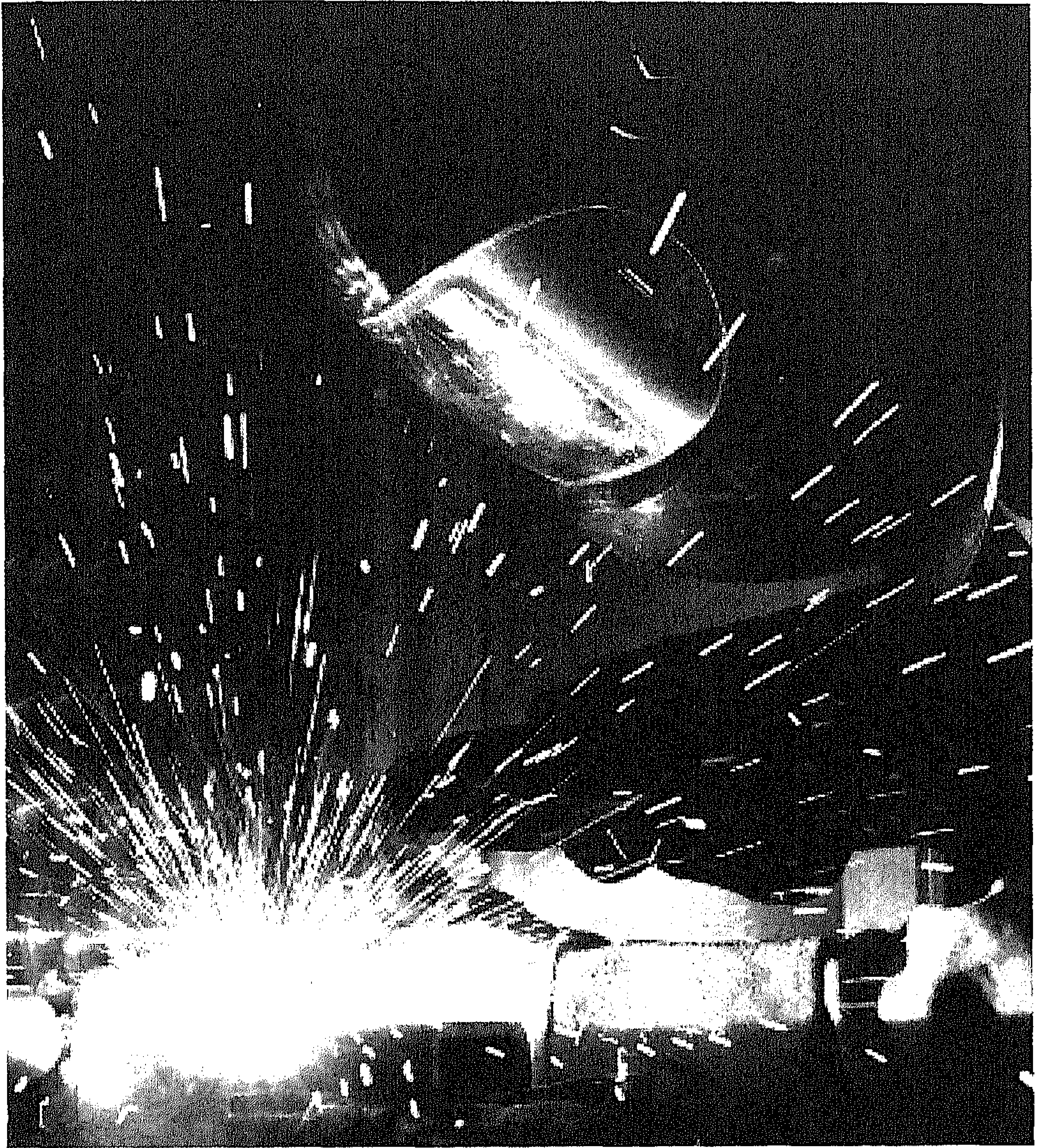
قـوس البلازمـا

مقدمة :

بدأت مبادئ اللحام بقوس الغاز والمعدن تتضح في القرن التاسع عشر، ففي سنة 1800م اكتشف Davy نابض الأقواس الكهربائية القصيرة، ثم اكتشف Vasily petrov القوس الكهربائي المستمر في 1802 م، وفي 1880 م أصبحت التكنولوچيا متقدمة بهدف الاستخدام الصناعي، واستخدم الأسلوب العملي للحام قوس الكربون التي اخترعها Benardos. في أواخر 1880 تم اختراع أقطاب معدنية من قبل Slavyanov . في عام 1953م تم تطوير استخدام ثاني أكسيد الكربون وسرعان ما اكتسب شعبية في GMAW. في الآونة الأخيرة قام المجربون بإضافة كميات صغيرة من الأكسجين إلى الغازات الخاملة، مما أدى إلى أسلوب جديد يسمى نابض رش قوس. الشكل (1) يوضح عملية اللحام بقوس الغاز والمعدن.

من العوامل التي يتم على أساسها اختيار سلك اللحام:

- التركيب الكيميائي لمعدن الأساس المراد لحامه.
- الخواص الفيزيائية لمعدن الأساس.
- نوع غاز الحجب المستخدم.
- نوع وشكل وصلة اللحام.
- نوع العمل وملاءمته للمواصفات المطلوبة.

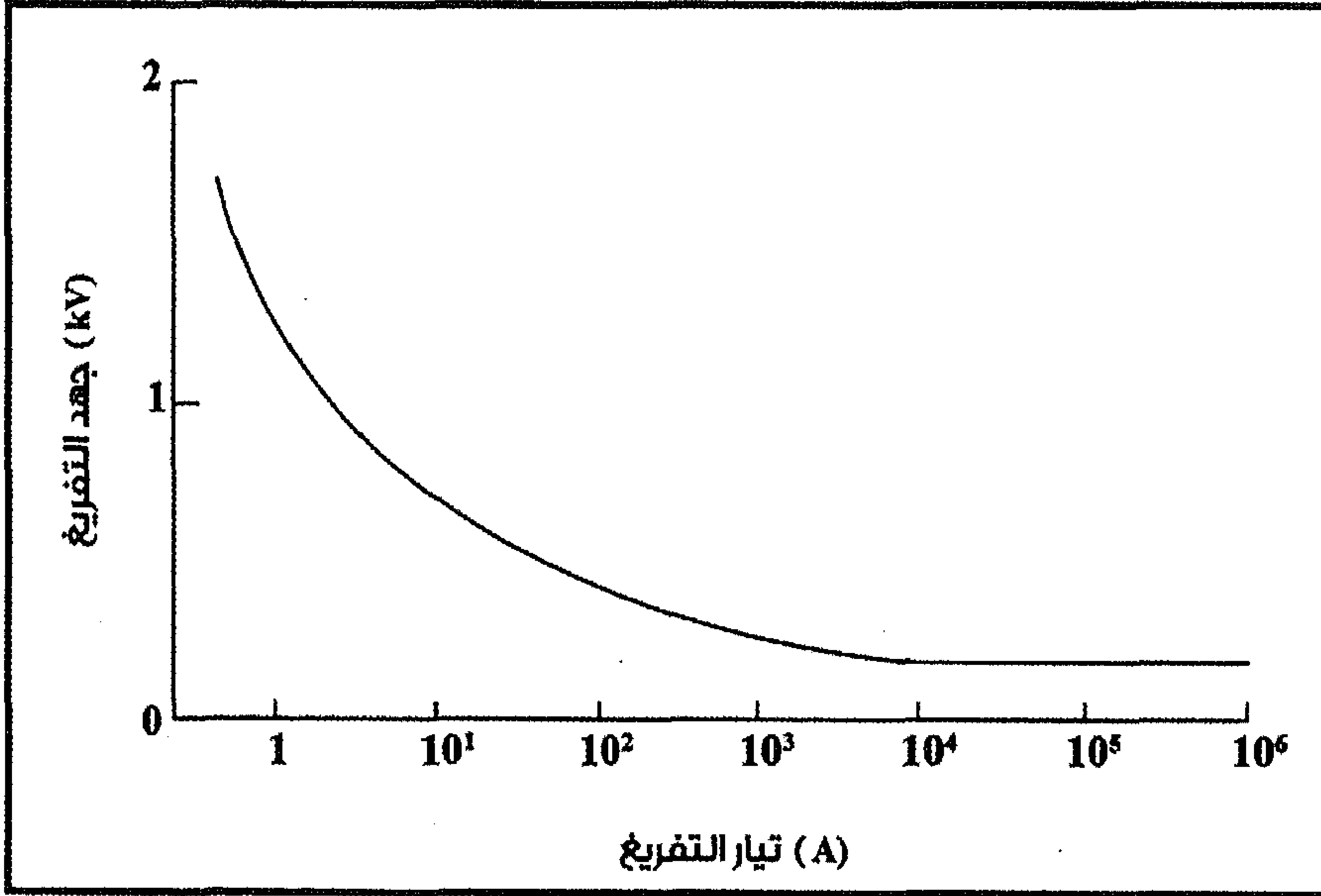


الشكل (1): صورة توضح عملية اللحام بقوس الغاز والمعدن

لأداء لحام القوس الغاز المعدني يجب أن تتوفر المعدات الأساسية اللازمة وهي لحام بندقية، أسلاك وحدة تغذية، لحام إمدادات الطاقة، سلك كهربائي، إمدادات غاز التدريع.

القوس الكهربي :

القوس الكهربي: وهو ما يسمى باللحام وهو طاقة لتصريف درجات حرارة عالية (~1000 كلفن). وتولد هذه الطاقة من عدة مصادر. وتستخدم بشكل عام بعمليات التعدين. فعلى سبيل المثال، تستخدم لإذابة الصخور المحتوية على أكسيد ألومونيوم لإنتاج معدن ألومونيوم. ومن مزايا قوس البلازما أنه يعمل كعازل للفلزات المراد لحامها. وينتج من قوس البلازما درجات حرارة عالية جدًّا، وبهذا يمكن استخدامها للفلزات التي يصعب لحامها بالطرق الأخرى. يتميز القوس الكهربي بتيار أكبر من 1 أمبير ودرجة حرارة عدة آلاف درجة سيلزيوس. مدى التشغيل المميز للقوس موضح بالشكل (2). عادة القوس يكون في حالة اتزان حراري وفي حالة انحلال جزيئي للغازات بالإضافة إلى الإثارة والتأين. القوس عادة يعمل كمصدر قدرة حرارية عالية مع درجة حرارة عالية وانثالبي.



الشكل (2): المنحنى المميز لقوس البلازما الحراري

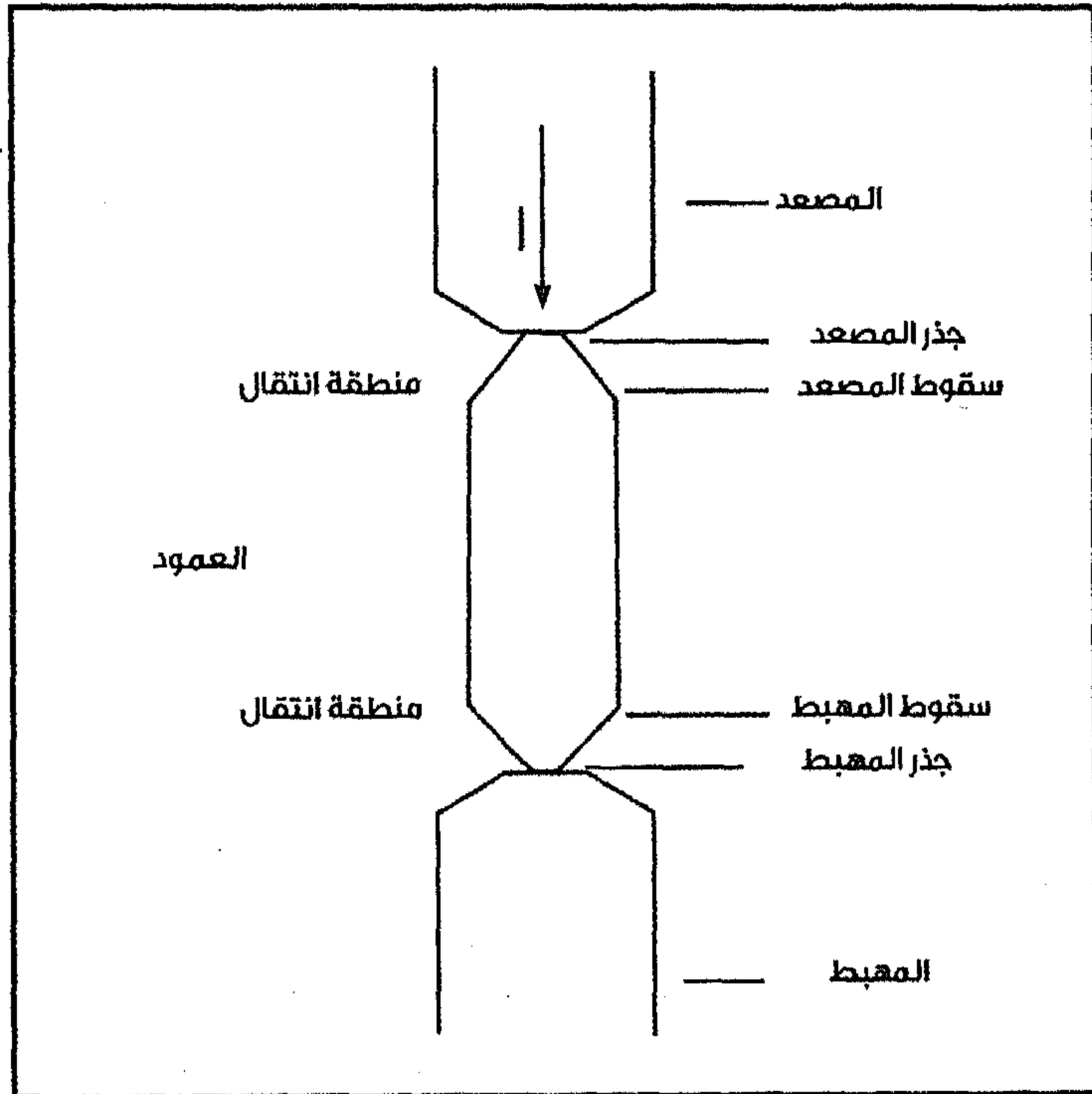
وفيما يلي بعض الخصائص الأساسية لعملية التقوس:

انخفاض فولطية المهبط (الكاثود) والأنود (المصعد) لأقل من 25 V.

ارتفاع درجة حرارة عمود البلازما لأكبر من 5000 k.

ارتفاع كثافة التيار عند جذر القوس.

كما تتميز الأقواس بالتبخير عند الأقطاب، وارتفاع كثافة التيار والمجال المغناطيسي الذاتي، التي تسبب تقلص التفريغ وحدوث قبص. ويمكن تقسيم عمليات تسخين القوس إلى ثلاث مناطق مختلفة من القوس (الشكل 3). أما مناطق هبوط الإلكترود للتفريغ، مثل اللحام حيث يتم استخدام قوس قصير غالبًا يستخدم بطول يبلغ بضعة مليمترات، انتقال حرارة من عمود القوس، مثل مشعل قوس البلازما وفرن القوس، أو كلاهما(مناطق إلكترود والأعمدة).

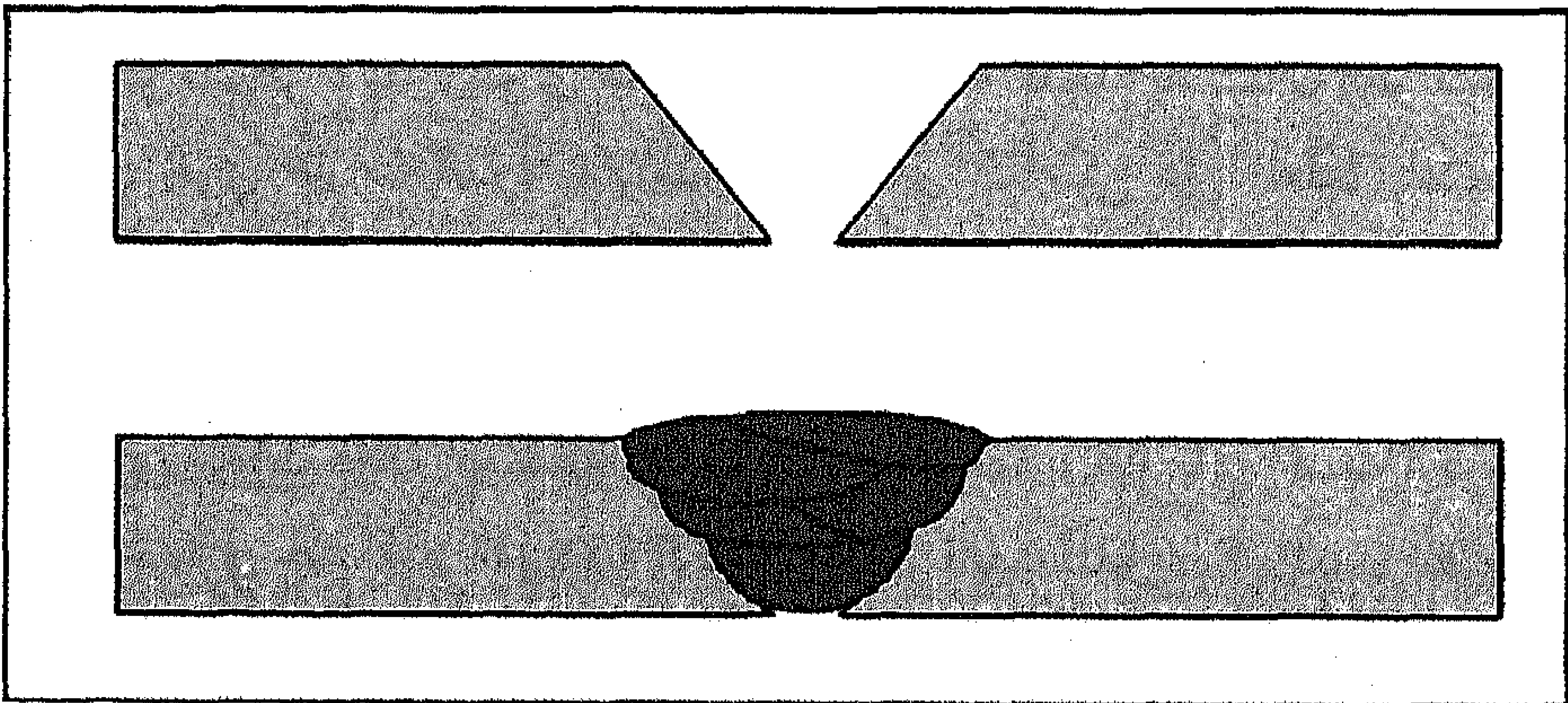


الشكل (3): المناطق الأساسية لقوس التيار العالي

عملية الحصول على قوس البلازما :

عملية الحصول على قوس البلازما: هي عملية تتم بسرعة عالية، حيث يتم تمرير غاز البلازما في مشعل البلازما حيث يمر الغاز عبر قوس كهربي مباشر ذي تردد عال جدا ينشأ بين الإلكترود (الذي يمثل القطب السالب) والمشغولة أو الحلقة النحاسية المحيطة بالإلكترود (الذي يمثل القطب الموجب). وبمرور الغاز عبر هذا القوس الكهربي يتسخن ويكتسب طاقة حرارية كبيرة ويتحول إلى حالة البلازما ((أيونات موجبة وأيونات سالبة)، وبتحول الغاز إلى حالة البلازما يصبح هذا الغاز ناقلا للكهرباء وباستمرار تدفقه نحو المشغولة من خلال الفوهة يقوم بنقل تيار كهربائي مستمر بين الإلكترود (سالب) والمشغولة أو الحلقة (موجب). بذلك تنشأ حرارة عالية ناتجة عن مرور تيار كهربي في ناقل (تسخين جول).

اللحام هو عملية الربط بين قطعتين معدنيتين متماثلتين أو مختلفتين بواسطة الصهر أو الضغط أو كليهما معا بحيث تصبح القطعتان قطعة واحدة بعد اللحام (انظر الشكل 4).



الشكل (4): عملية الربط بين قطعتين معدنيتين متماثلتين أو مختلفتين بواسطة اللحام

تتم عملية اللحام من خلال أي من المبادئ التالية :

يتم صهر جزء من معدني الأساس بواسطة مصدر حراري حيث تتكون منطقة ذائبة بين القطعتين تسمى بركة اللحام، وعند تصلب هذه البركة تتكون وصلة اللحام، ويمكن إضافة مادة خارجية إلى البركة لملء الفراغ بين القطعتين تسمى «المادة المضافة». يتم لحام المعدنين بصهر جزء منهما دون الحاجة إلى مادة مضافة. يتم رفع درجة حرارة المعدن الأساس إلى درجة الاحمرار دون الوصول إلى درجة الانصهار، ثم يتم ضغط طرفي المعدن فينساب المعدن الذي يكون بدرجة لدنة عالية وتتكون وصلة اللحام. كذلك يمكن أن تتم عملية لحام معدنين دون صهرهما أو ضغطهما وذلك عن طريق إذابة معدن إضافي تكون درجة انصهاره أقل من معدن الأساس وتسمى هذه العملية باللحام بالمونة.

عند إجراء عملية اللحام يتم صهر المعدن أو تسخينه إلى درجة حرارة عالية (درجة الاحمرار) لإعطاء لدونية عالية، والمعدن في مثل هذه الحالة يكون سريع التأثر بالجو الخارجي حيث يتأكسد بسرعة، كذلك فإن هنالك غازات أخرى يمكن أن تكون ذات أثر سيئ على بركة الصهر، ولكي نتجنب حدوث مثل هذه التأثيرات ولعمل حماية جيدة للمعدن في منطقة اللحام سواء في حالة الصهر والتسخين فإنه يتم استخدام الحماية بواسطة جو مسيطر عليه. ويتم في هذه الحالة حماية بركة اللحام باستبدال الجو المحيط بها والذي يحوي غازات ضارة بغازات ليس لها أي أثر سيئ على المعدن المصهور، وهناك نوعان من الغازات تستخدم وهي غازات خاملة مثل الأرجون والهليوم، وعند استخدام مثل هذه الغازات يمكن لحام المواد عالية التأكسد مثل التيتانيوم والزركونيوم والمغنيسيوم. غازات فعالة أو نشطة أهمها وأكثرها استخداما غاز ثاني أكسيد الكربون الذي يستخدم في لحام المواد الفولاذية الكربونية؛ لأن قابليته للذوبان في المعدن المصهور محدودة جدا، علما بأن جزءًا من الغاز يتحلل ويدخل في بركة اللحام ولكن بكميات قليلة، ويتم التخلص منه بواسطة إضافة منجنيز أو سيلكون لمعدن الأساس أو معدن الإضافة.

الحماية بواسطة العزل وطرد الأكسيد :

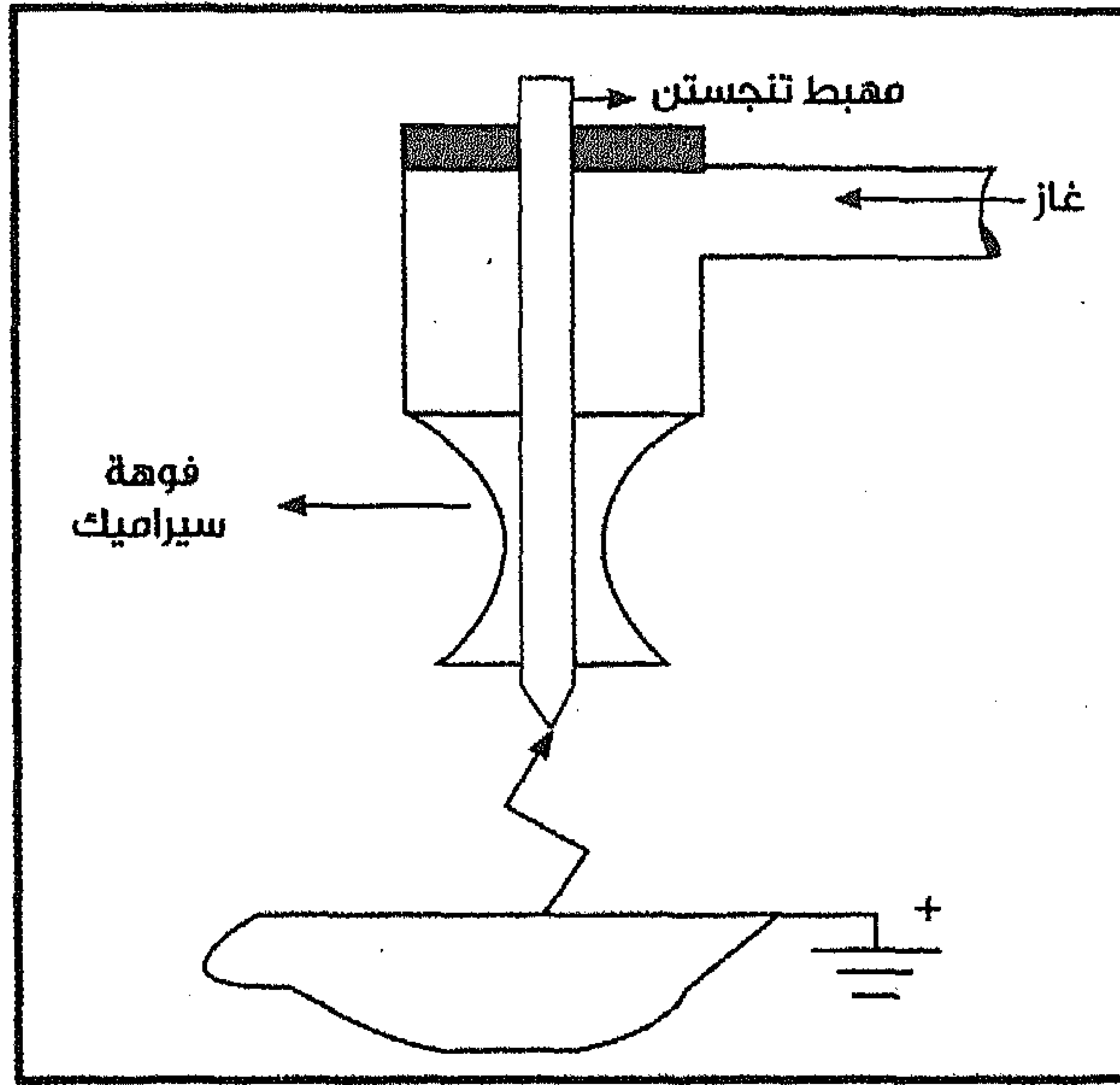
كما هو الحال في لحام المقاومة الكهربائية حيث تكون المنطقة معزولة عن الجو الخارجي وكذلك في لحام الاحتكاك حيث تكون المنطقة معزولة، ويتم طرد الأكاسيد نتيجة للاحتكاك.

الحماية بواسطة التفريغ :

ويتم التفريغ في المنطقة المحيطة بوصلة اللحام وإلى درجات عالية من التفريغ وكما هو الحال في لحام الحزمة الإلكترونية.

اللحام بالقوس الكهربي (لحام المعادن بواسطة الحرارة المتولدة عن قوس كهربي). ففي اللحام القوس للفلز المعزول يتكون القوس الكهربي بين القطب الكهربي المغطى بالصهر والفلزات المراد لحامها.

للحام بالقوس تتم عملية توصيل المواد الفلزية في اللحام القوس باستخدام الحرارة المتولدة من قوس كهربي. ومن أنواعه اللحام القوس للفلز المعزول، ويتكون القوس الكهربي في هذه الحالة بين المواد الفلزية والقطب الكهربي المغطى بالصهر. وتقوم الحرارة الناتجة عن القوس الكهربي بصهر الفلز والقطب الكهربي والصهر. أما في اللحام القوس المغمور فيغطى القوس الكهربي بمسحوق صهر موجود في وعاء متصل بآلة اللحام. ويتكون القوس الكهربي في هذه الحالة بين المواد الفلزية وقطب كهربي سلكي مستهلك يقوم مقام المادة المالئة لوصلة اللحام. وتتم تغذية القطب الكهربي المستهلك بانتظام من آلة اللحام من خلال ملف، وتوجد طريقة أخرى للحام القوس وهي طريقة لحام الغاز والتنجستن (شكل 5).



الشكل (5): طريقة لحام الغاز والتنجستن

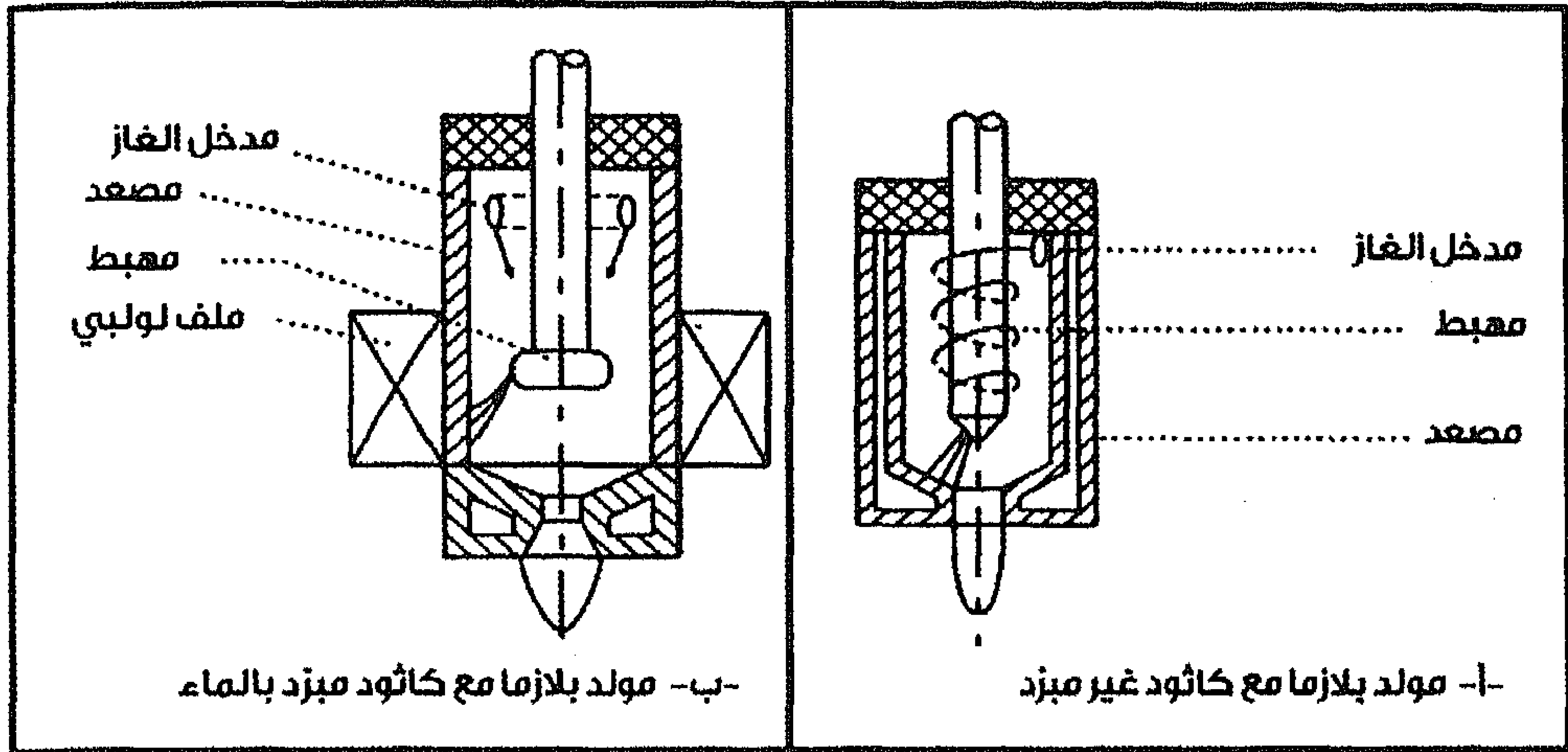
في هذه الطريقة يتم توجيه قوس كهربائي بين الفلزات وقطب كهربائي سلكي مكشوف، مصنوع من التنجستن، الذي لا ينصهر بتأثير الحرارة المتولدة من القوس الكهربي، ويستخدم غاز الأرجون أو غاز الهليوم لعزل الفلزات. وفي طريقة اللحام القوس البلازمي يسخن غاز الأرجون أو غاز مماثل كهربائيا، حتى يتحول إلى حالة متأينة تسمى البلازما، ويوجه قوس البلازما نحو الفلزات لوصلها معًا، ويضاف فلز الحشو بصورة منفصلة.

بما أن الغاز الواقي يعزل الهواء المحيط عن بركة الانصهار لذلك تكون وصلة اللحام أكثر قوة ومقاومة للتآكل عن غيرها من وصلات اللحام المعمولة ضمن إجراءات أخرى. فالغاز العازل للقوس الكهربي يسهل لحام المعادن غير الحديدية بحيث لا تكون هناك حاجة إلى بودرة (مادة مساعدة على صهر المعدن) لأنه كلما كانت عملية اللحام بحاجة إلى بودرة كانت هناك دائمًا مشاكل في تتبع أثر البودرة بعد عملية اللحام، والأكثر من ذلك فإن استعمال البودرة يزيد من احتمال تولد الخبث والجيوب الغازية

وانتشارها. فهذا النظام يصلح لجميع أوضاع اللحام، مع أقل كمية من الذرات المعدنية (الشرر) مما يجعل سطح اللحام ناعما وبذلك نوفر التكاليف اللازمة لعمليات التشطيب النهائية للسطح.

التسخين بالبلازما :

يقصد بالبلازما حالة المادة في درجات الحرارة الأعلى من 1000° درجة مئوية، إذ تُحوّل باستخدام غاز خامل كالأرجون. يمرر هذا الغاز من منفث ضيق بسرعة عالية، حيث إنه يتعرض لقوس كهربي (أي تفريغ كهربي عالٍ خلال غاز متأين، ويتم هذا التفريغ وارتفاع درجة الحرارة باصطدام الإلكترونات بأيونات الغاز الموجود فيتأين هذا الغاز وتتحلل جزيئات منه مولدةً حرارة عالية جدا 16000 – 22000° درجة مئوية حسب سرعة مرور الغاز). يسخن المنتج في جهاز البلازما في لهب الغاز المنفوخ خلال القوس. يدعى الجهاز الذي يحول الطاقة الكهربية إلى طاقة حرارية لفيض بلازما الحرارة المنخفضة بمولد البلازما (الشكل 6). تقسم مولدات البلازما إلى نوعين: مولدات بلازما قوسية، إذ يحقن الغاز إلى مجال التفريغ الكهربي القوس، ومولدات بلازما عالية التردد أي تفريغ لا إلكترودي عالي التردد. تتألف معظم مولدات بلازما القوس من مصعد أنبوبي نحاسي مبرد وقضيب مقاوم لدرجات الحرارة العالية أو مهبط نحاسي حلقي مبرد. ويكون عادة الغاز العامل: أرجون، هليوم، هيدروجين، ميثان. تستخدم أجهزة التسخين بالبلازما في عمليات تسخين المعادن وصهرها وكذلك في عمليات اللحام وصهر المواد المقاومة لدرجات الحرارة العالية. وتستخدم مولدات البلازما عالية التردد من أجل استنبات البلورات الأحادية للمواد المقاومة للصهر.

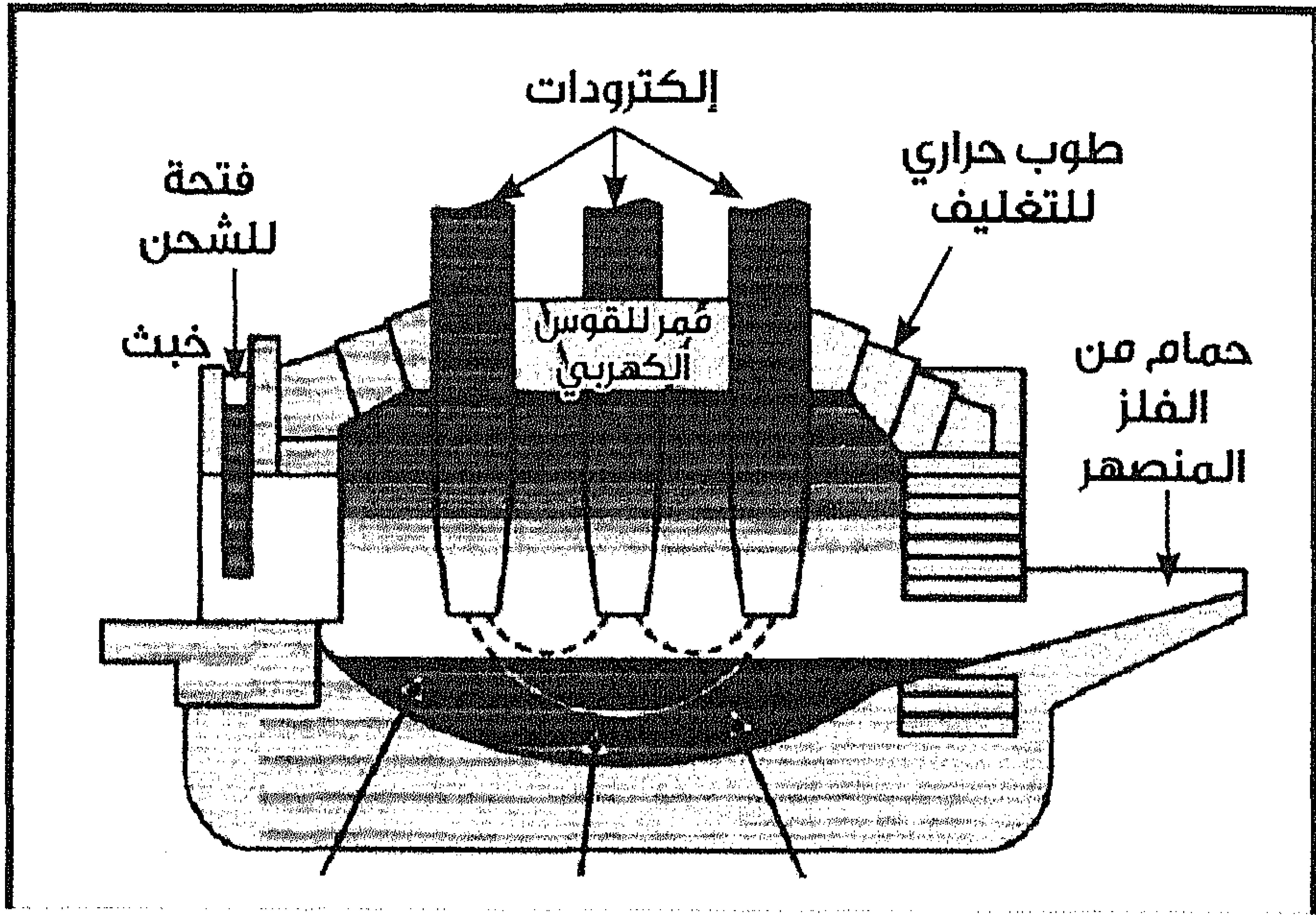


الشكل (6): مولدات البلازما

التسخين بالقوس الكهربي :

يعد فرن القوس الكهربي electrical arc furnace من أكثر أنواع الأفران الكهربية استخدامًا لإنتاج الفولاذ. إذ يتكون فرن القوس الكهربي من غلاف فولاذي بشكل دائري مبطن من الداخل بالطوب الحراري ويبرد بالماء في الأماكن التي تتعرض لدرجات الحرارة العالية.

هناك في سقف الفرن ثلاثة ثقوب يتم فيها وضع ثلاثة قضبان من الكربون، يطلق عليها الأقطاب، توضع في الشحنة لتوصيل التيار الكهربي إليها. يتقوس (يقفز) تيار كهربي قوسي قوي من كل قطب إلى مادة الشحنة ومنها إلى القطب الآخر، وبالتالي يتشكل قوس كهربي بين الأقطاب الجرافيتية الثلاثة والمعدن نتيجة مرور تيار كهربي متناوب ثلاثي الطور (الشكل 7).



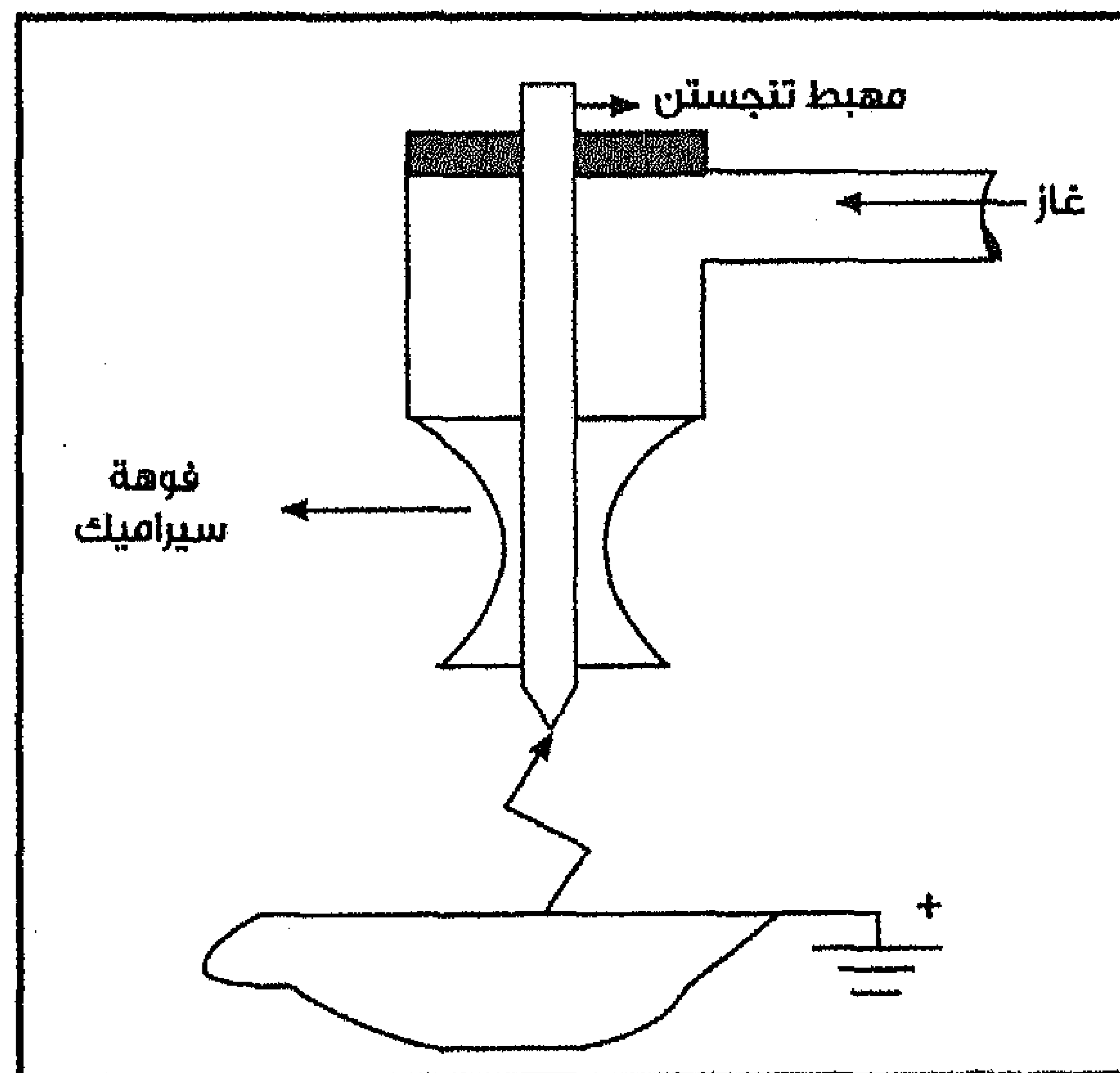
الشكل (7): فرن القوس الكهربي

تستخدم في هذه الأفران أقطاب جرافيتية أو فحمية، وتمتاز الأقطاب الجرافيتية عن الفحمية بانخفاض مقاومتها للتيار الكهربائي مما يخفض الضياع الكهربائي، وبمتانتها العالية واستهلاكها أقل من الأقطاب الفحمية حيث تستهلك ما بين 8 كيلو جرام إلى 10 كيلو جرام لكل طن من المعدن المصهور.

ينتج عن هذه الأقواس الكهربية كميات هائلة من الحرارة تصهر المادة بسرعة وتحفز التفاعلات الكيميائية التي تنتج الفولاذ. وتعد أفران القوس الكهربي أسلوبًا مثاليًّا لصناعة بعض أنواع سبائك الفولاذ الخاصة وفولاذ العُدَد، كما تستخدم بشكل واسع من أجل صهر المعادن الحديدية والمواد اللامعدنية وكذلك المواد المقاومة للصهر والبلاستيك المقاوم للحرارة.

لحام القوس الكهربي باستخدام المعدن والغاز: Gas Metal Arc Welding (GMAW)

يشار إليها أحيانا بلحام المعدن في وجود غاز خامل (MIG). عملية قوس اللحام هو شبه تلقائي أو تلقائي لديه سلك مستمر ومستهلكات ويتم تغذية الكهربائي والغاز عن طريق لحام بندقية التدريع (شكل 8). الجهد المستمر مصدر طاقة التيار مع GMAW ، يمكن استخدام النظم الحالية ثابتة، فضلا عن التيار المتردد. هناك أربع طرق رئيسية لنقل المعادن في GMAW كروي، تلامس في الدائرة، الرذاذ، نابض بالرش، لكل منها خصائص متميزة ومزايا. سنة 1940 وضعت لحام الألومونيوم وغيرها من المواد غير الحديدية. تم تطبيق لحامGMAW الفولاذ لأنه يتم في وقت أقل مقارنة مع غيرها من عمليات اللحام. تكلفة غاز خامل يقتصر استخدامه في الفولاذ، أما استخدام الغازات شبه الخاملة مثل ثاني أكسيد الكربون فإنه أكثر شيوعا. اليوم عملية اللحام الصناعي GMAW هي الأكثر شيوعا، ويفضل لتنوعها والسرعة والسهولة. يستخدم لحام GMAW على وجه الخصوص في صناعة السيارات، خلافا لعمليات اللحام التي لا تستخدم غاز التدريع مثل لحام المعادن محمية القوس.



الشكل (8): لحام القوس الكهربي باستخدام المعدن والغاز

نموذج GMAW لحام بندقية غير قابل للصدأ يتكون من عدة مفاتيح للسيطرة على قطع التبديل، تلميح الاتصال، كابلات كهرباء، فوهة الغاز، وهي قناة الكهربائي والخطوط الملاحية المنتظمة وخرطوم الغاز. مفتاح تحكم، أو المشغل، عند الضغط عليه من قبل المشغل، يبدأ بتغذية الأسلاك، والطاقة الكهربائية، وتدفق غاز التدريع، مما تسبب في ضرب القوس الكهربي. ويرتبط تلميح الاتصال، التي تقدم عادة من النحاس وأحيانا المعالجة كيميائيا للحد من ترشش يتم اللحام عن طريق كابلات الكهرباء وينقل الطاقة الكهربائية إلى القطب بينما يتم توجيهها إلى منطقة اللحام. ويجب أن يكون المضمون بحزم والحجم بشكل صحيح لأنه يجب أن تسمح بمرور القطب مع الحفاظ على الاتصال الكهربي. قبل وصوله إلى تلميح الاتصال. إن حماية الأسلاك واسترشاد قناة الكهربائي والخطوط الملاحية المنتظمة تساعد على منع الالتواء والمحافظة على تغذية السلك دون انقطاع. وتستخدم فوهة الغاز للتوجيه بالتساوي غاز التدريع في منطقة اللحام. إذا كان التدفق غير متناسق، فإنه قد لا توفر الحماية الكافية لمنطقة اللحام.أما إذا كانت الفوهات أكبر فيتم توفير قدر أكبر من تدفق غاز التدريع وهو أمر مفيد للارتفاع في عمليات اللحام الحالي، الذي يقوم بزيادة حجم اللحام المصهور. تتصل فوهة خرطوم، والتي تتصل بخزانات غاز التدريع.

معظم تطبيقات لحام قوس غاز المعادن تستخدم جهدًا ثابتًا لإمدادات الطاقة. ونتيجة لذلك التغيير في طول القوس (التي هي ذات صلة مباشرة بالجهد) النتائج تغير بشكل كبير في الحرارة والمداخلات الحالية وبالتالي قصر طول قوس يؤدي إلى إدخال قدر أكبر من الحرارة، الأمر الذي سيجعل السلك الكهربائي يذوب بسرعة أكبر وبالتالي استعادة طول القوس الأصلي. وهذا يساعد مشغليه بإبقاء طول قوس ثابت حتى عندما يقوم باللحام يدويا مع المدافع لحام باليد لتحقيق الأثر المماثل، وأحيانا يستخدم ثابت مصدر الطاقة الحالية في تركيبة قوس الجهد الذي يسيطر على أسلاك وحدة تغذية، هذه الحالة تغير في طول قوس الذي يجعل ضبط معدل تغذية الأسلاك من أجل الحفاظ على طول قوس ثابتة نسبيا. في حالات نادرة ثابت مصدر الطاقة الحالية وتغذية السلك

ثابت سعر الوحدة، ولاسيما لحام المعادن مع التوصيلات الحرارية العالية، مثل الألومونيوم. هذه المنح إضافية لسيطرة المشغل على إدخال الحرارة في اللحام، ولكنها تتطلب مهارة كبيرة.

فرن القوس الكهربي :

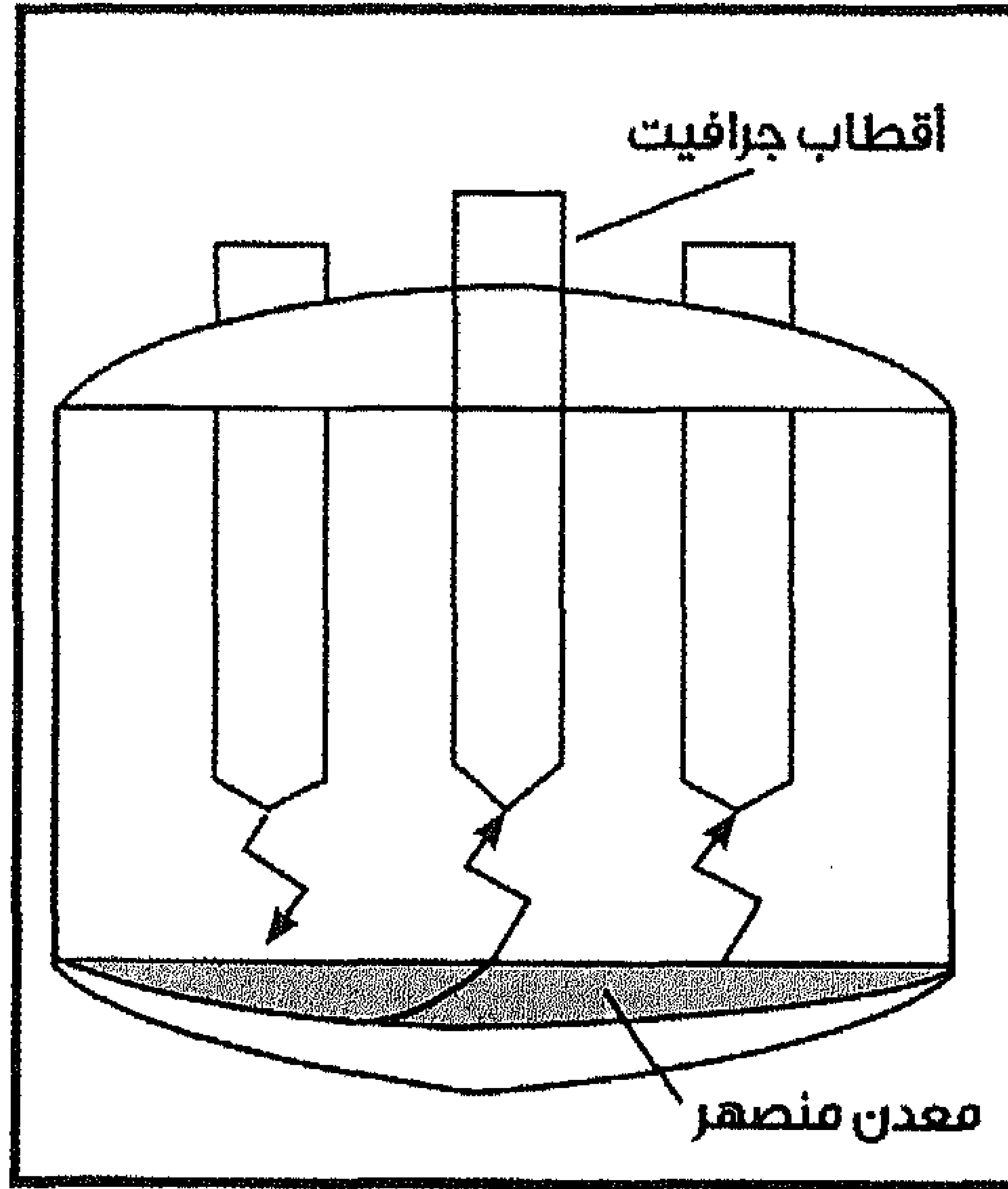
من أهم التطبيقات المبكرة للقدرة الكهربية الأفران الكهربية التي تتراوح بين انصهار عدة جرامات من المعادن النفيسة وكميات كبيرة من الخردة وخصوصا الصلب وسبائك الحديد. على سبيل المثال يوجد الفرن الكهربي الذي يعمل بالتيار المتناوب ذي الثلاثة أوجه (شكل 9). كانت تستخدم منذ نهاية القرن التاسع عشر لصهر سبائك الصلب والحديد والمعادن الأخرى.

وتتصل الأقطاب على شكل دلتا وتعلق بمشابك فوق سقف الفرن. توصيل الدلتا مهم عند التيارات العالية (عشرات آلاف من الأمبير) لتقليل الحث الذاتي وظاهرة القشرة (skin phenomenon) والدائرة موضحة بالشكل (10). تبلغ سعة فرن القوس الكهربي النموذجي 110 – 130 طنًّا من المعدن المنصهر بقطر حوالي 6.5 متر ومعدل القدرة الكهربية 65 مليون وات. فولطيات الدائرة المفتوحة ما بين 400 – 900 فولت تيار متناوب، وقيمة تيار القوس المستخدم حوالي 70 كيلو أمبير، والحد الأدنى للفاصل بين الأقطاب يحكم بقوى التجاذب والتنافر ($f \propto I_1 I_2$) بين الأقواس التي تحد من التيار في الفرن.

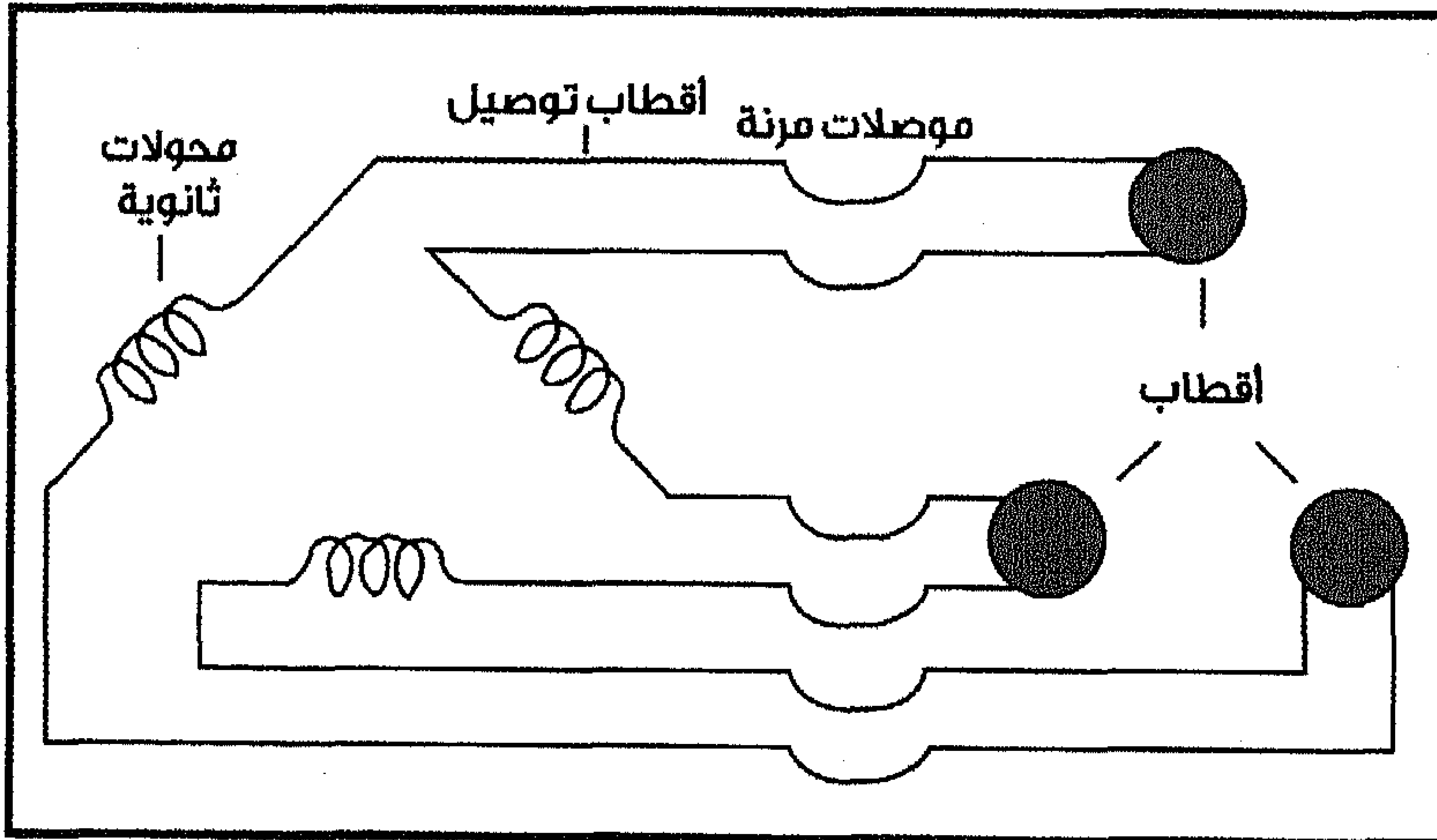
كل إلكترود يتحرك بصورة مستقلة لمراقبة الجهد الكهربي للقوس وتيار القوس أقل منه. طول القوس أطول في العديد من عمليات التقوس الأخرى. وانخفاض الجهد الكهربائي على طول العمود القوس عادة أكبر بكثير من مجموع جهود الأقطاب الهابطة:

$$El_{col} >> Vc + Va$$

حيث Vc جهد الكاثود، Va جهد الأنود و E المجال الكهربي، I_{coL} طول العمود يحدث نقل الحرارة إلى المعدن أثناء الذوبان أساسا من عمود القوس الطويل وأثناء التكرير بالإشعاع من نهايات الأقطاب إلى الحمام المنصهر.



الشكل (9): فرن الصهر (القوس الكهربي) ذو الثلاثة أوجه



الشكل (10): وصلات الدلتا لتقليل الحث الذاتي لفرن الصهر ذي الثلاثة أوجه

القصص بقوس البلازما :

تتم عملية القص بقوس البلازما باستخدام القوس المنقول (المادة المراد قصها والمشعل والقطب) بحيث تتعرض قطعة الشعلة لحرارة البلازما وحرارة القوس، ويوضع القطب داخل المشعل ضمن الفوهة حيث تعمل فتحة الفوهة على حصر القوس. بمرور الغاز عبر القوس الكهربي يتحول إلى بلازما تنطلق مندفعة خارج الفوهة إلى القطعة المعدنية المراد قطعها.

يستخدم القص بقوس البلازما على نطاق واسع للمواد التي يصعب قصها بالوسائل الأخرى كالصلب المقاوم للصدأ والألومونيوم بجانب التيتانيوم والتنجستن والصلب الكربوني. ويتحقق القص بالصهر وليس بالأكسدة فيقدح قوس البلازما بين قطب التنجستن والمنفث النحاسي المبرد بالماء الذي يمر من خلال فوهته خليط الغاز تحت ضغط مرتفع، ويندفع بشكل تيار بلازما ذات درجة حرارة عالية حوالي $17000C^0$. الشكل (11) يوضح معدات القص بقوس البلازما التي تتطلب ماكينة القص (مصدر الطاقة) ومشعل القص ومصدر الغاز والهواء ومصدر التبريد.

تستخدم عادة وحدات من القص بقوس البلازما بقدرة 20 كيلو وات وجهد كهربي 220 فولت أو 380 أو 415 فولت، وشدة تيار تتراوح بين 10 أمبير و 100 أمبير. يستخدم خليط من غاز الأرجون بنسبة 10٪ ونيتروجين بنسبة 90٪ للصلب المقاوم للصدأ حتى سمك 6.5 مم، وما يزيد عن ذلك حتى 25 مم يستخدم خليط من الأرجون بنسبة 80٪ مع الهيدروجين بنسبة 20٪ .

مميزات القص بقوس البلازما :

1- عمليات القطع تكون خالية من الخبث خاصة في المعادن التي يصعب قصها مثل النيكل، النحاس، الحديد الزهر، الفولاذ، الألومونيوم وغيرها من المعادن.

2- عمليات القطع تكون نظيفة في معظم المعادن.

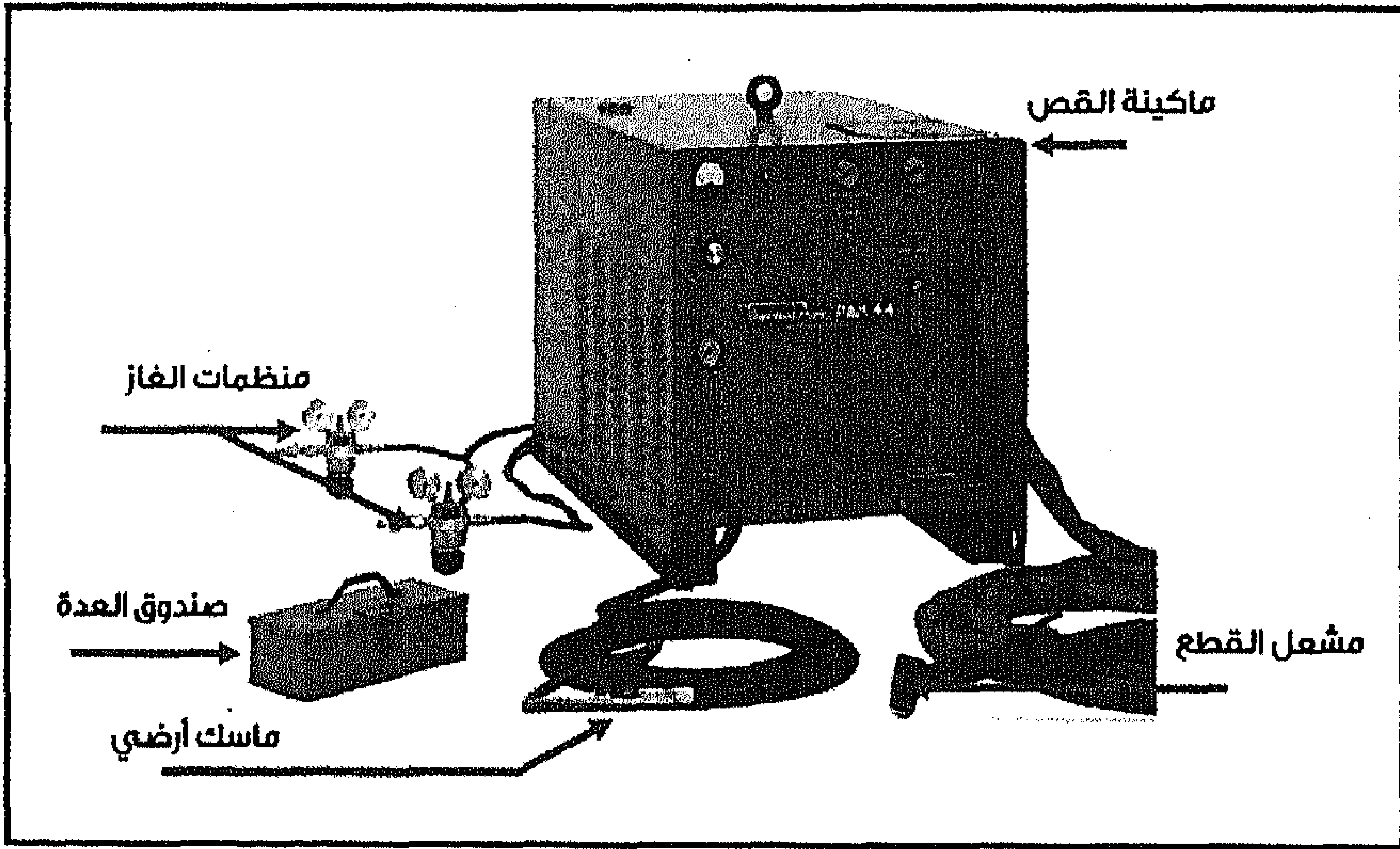
3- يمكن إجراء عملية القص بسرعة تصل إلى 300 بوصة في الدقيقة.

4- تنتج العملية قطعيات بالغة الدقة وبشق ضيق للغاية.

5- قص الأشكال المعقدة بسهولة.

6- لا يستلزم تسخين مسبق عند قص الفولاذ الكربوني.

7- يمكن قص عدة صفائح متراصة بسمك يتراوح بين 1/ 16 بوصة و 1/ 4 بوصة.



الشكل (11): معدات القص بقوس البلازما

مشعل القطع بقوس البلازما :

وظيفة المشعل هي إيصال التيار والغاز إلى منطقة القص بالإضافة إلى توزيع غاز البلازما داخل غرفة الحصر (حول القطب)، ومن ثم يجري تسخينه بالقوس الدليلي (وهو قوس مستمر ذو تيار منخفض يتكون بين القطب وفوهة التضييق بغرض تأين الغاز وتسهيل عملية البدء في اشتعال القوس) يتمدد ويتأين الغاز ثم يندفع للخروج بقوة من غرفة الحصر بسرعة عالية من خلال فتحة الفوهة الضيقة مكونا لهب البلازما الذي يمتد خارج الفوهة بطول يصل إلى 8 – 10 بوصة.

مصابيح التفريغ الغازي :

مصابيح التفريغ الغازي هي أسرة مكونة من مصادر الضوء الاصطناعي التي تولد الضوء بإرسال التفريغ الكهربائي عن طريق غازات متأينة، أي بلازما. التفريغ الغازي يعتمد على التردد أو تعديل التيار. نموذجيًّا، هذه المصابيح تستخدم غازات خاملة (الأرجون والنيون، الكريبتون والزينون) أو خليطًا من هذه الغازات. معظم المصابيح مليئة بمواد إضافية، مثل الزئبق والصوديوم وهاليدات معدنية. في التشغيل يتأين الغاز، يتم تعجيل الإلكترونات الحرة بالمجال الكهربائي في الأنبوب، وتتصادم بالغاز وذرات المعادن. بعض الإلكترونات في المدارات الذرية لهذه الذرات تثار بهذه الاصطدامات إلى حالة الطاقة الأعلى. عندما ترتد الذرة المثارة إلى حالة الطاقة الأقل، ينبعث منها فوتون بطاقة مميزة، مما يؤدي إلى انبعاث ضوء الأشعة تحت الحمراء، والمرئية، أو الأشعة فوق البنفسجية. بعض المصابيح تعمل على تحويل الأشعة فوق البنفسجية إلى ضوء مرئي بطلاء فلوري على السطح الزجاجي الداخلي للمصباح. المصباح الفلوري هو ربما أفضل مصباح تفريغ غازي معروف.

تتميز مصابيح التفريغ الغازي بطول العمر والكفاءة العالية، ولكن هي أكثر تعقيدًا لتصنيعها، وأنها تتطلب معدات إلكترونية مساعدة مثل الكابح للتحكم في تدفق التيار خلال الغاز. نظرًا لزيادة كفاءتها، يتم استبدال مصابيح التفريغ بالمصابيح المتوهجة في العديد من تطبيقات الإضاءة.

بدأ تاريخ مصابيح التفريغ الغازي في عام 1675 عندما لاحظ الفلكي الفرنسي جان فيليكس بيكار توهج المساحة الفارغة في مقياس الضغط الزئبقي كلما تهزهز الزئبق أثناء حمله للبارومتر. حاول المحققون، بما في ذلك فرانسيس هاوكسبي تحديد سبب هذه الظاهرة. هاوكسبي هو أول من أوضح مصباح التفريغ الغازي في عام 1705. وأظهر أنه بتفريغ زجاجة كروية الشكل أو تفريغها جزئيا، ووضع كمية صغيرة من الزئبق بها، وأثناء شحنها بكهربية ساكنة يمكن أن تنتج ضوءا ساطعا بما يكفي للقراءة بواسطته.

ووصفت ظاهرة القوس الكهربي أولًا من قبل « بيتروف»، أحد علماء الروس، في عام 1802، وأظهر ديفي Humphry في نفس العام القوس الكهربي في «المؤسسة الملكية لبريطانيا العظمى». ومنذ ذلك الحين، تم إجراء البحوث حول مصادر ضوء التفريغ لأنها تخلق الضوء من الكهرباء إلى حد كبير أكثر فعالية من المصابيح المتوهجة. واكتشف لاحقًا أنه بالتفريغ بالقوس يمكن الاستفادة إلى أقصى حد باستخدام غاز خامل بدلًا من الهواء كوسط؛ ولذلك استخدمت الغازات الخاملة النيون والأرجون أو الكريبتون والزينون، فضلا عن ثاني أكسيد الكربون.

وكان إدخال مصباح بخار المعادن، بما في ذلك المعادن المختلفة داخل أنبوب التفريغ، خطوة إلى الأمام فيما بعد. حرارة التفريغ الغازي تبخر بعضًا من المعدن ومن ثم تنتج التفريغ بشكل حصري تقريبا بالبخار المعدني. المعادن المعتادة هي الصوديوم والزئبق نظرًا إلى انبعاثها الطيف المرئي. مائة عام من البحث لاحقًا أدت إلى مصابيح دون أقطاب يتم تنشيطها بمصادر الموجات الدقيقة أو تردد الراديو. وبالإضافة إلى ذلك، تم إنشاء مصادر الضوء بناتج أقل بكثير، لتنتشر تطبيقات إضاءة التفريغ للاستخدامات المنزلية أو الأماكن المغلقة.

الألوان :

تقوم مصابيح التفريغ الغازية بإنتاج الضوء عن طريق مرور الكهرباء خلال غاز تحت الضغط، بدلًا من توهج الفتيلة. ومثل هذه العملية تدعى تفريغًا كهربائيا. وتُسمى مثل هذه المصابيح أحيانًا مصابيح تفريغ كهربي. وتضم هذه العائلة من المصابيح: المصابيح الفلورية ومصابيح النيون ومصابيح الصوديوم منخفضة الضغط ومصابيح بخار الزئبقي ومصابيح الهاليد المعدنية ومصابيح الصوديوم عالية الضغط. ويُعَدّ ضوء القوس الكهربي نوعًا من مصابيح التفريغ الغازي، ولكن التفريغ في هذه الحالة لا يتم داخل زجاجة.

لا تُستخدم المصابيح الفلورية كثيرًا في المنازل، لكنها كثيرة الاستخدام في المكاتب والمدارس والمحلات التجارية. ويقوم مهندسو الإضاءة بتركيب أنواع أخرى من مصابيح التفريغ الغازي في المساحات الداخلية والخارجية الواسعة، وتشمل مثل هذه المساحات المصانع والطرق ومواقف السيارات ومراكز التسويق والملاعب المدرَّجة. وتستخدم معظم مصابيح النيون في الإعلانات التجارية.

وباستثناء المصابيح الفلورية فإن مصابيح التفريغ الغازي لا تستخدم في المنازل. فلون الأشياء يبدو مختلفًا عند إضاءة هذه المصابيح، كذلك تزيد تكلفة هذه المصابيح على مثيلتها من المصابيح المتوهجة، لكنها تُعَمِّر أطول وتعطي ضوءًا أشد مقابل كل وات من القدرة؛ ولذا فإن حسابًا جامعًا لكل هذا قد يجعلها أرخص من المصابيح المتوهجة.

مصابيح التفريغ الغازي منخفضة الضغط :

تستخدم غازات الأرجون أو النيون أو غازات أخرى تحت ضغط منخفض لتقوم بإنتاج الضوء. وتضم هذه العائلة المصابيح الفلورية ومصابيح النيون ومصابيح الصوديوم منخفضة الضغط.

المصابيح الفلورية : يتكوّن المصباح الفلوري من أنبوب زجاجي يحتوي على غاز الزئبق وغاز الأرجون تحت ضغط منخفض. وتُسبب الكهرباء التي تسري في الأنبوب انبعاث الطاقة فوق البنفسجية من الزئبق المبخر. والعين لا ترى طاقة الأشعة فوق البنفسجية في صورة ضوء. كما أن السطح الداخلي للأنبوب مغطى بمادة مفسفرة تبعث ضوءًا مرئيًّا عندما تصيبها طاقة الأشعة فوق البنفسجية. انظر: المصباح الفلوري؛ المادة الفسفورية.

مصابيح النيون : أنابيب مملوءة بالغاز، تتوهج عندما تحدث عملية تفريغ كهربائية داخلها. فغاز نيون نقي في أنبوب صاف يُعطي ضوءًا أحمر اللون. ويمكن إنتاج الضوء في ألوان أخرى بمزج غاز النيون بغازات أخرى، أو باستخدام أنابيب ملونة أو مزيج من هاتين الطريقتين.

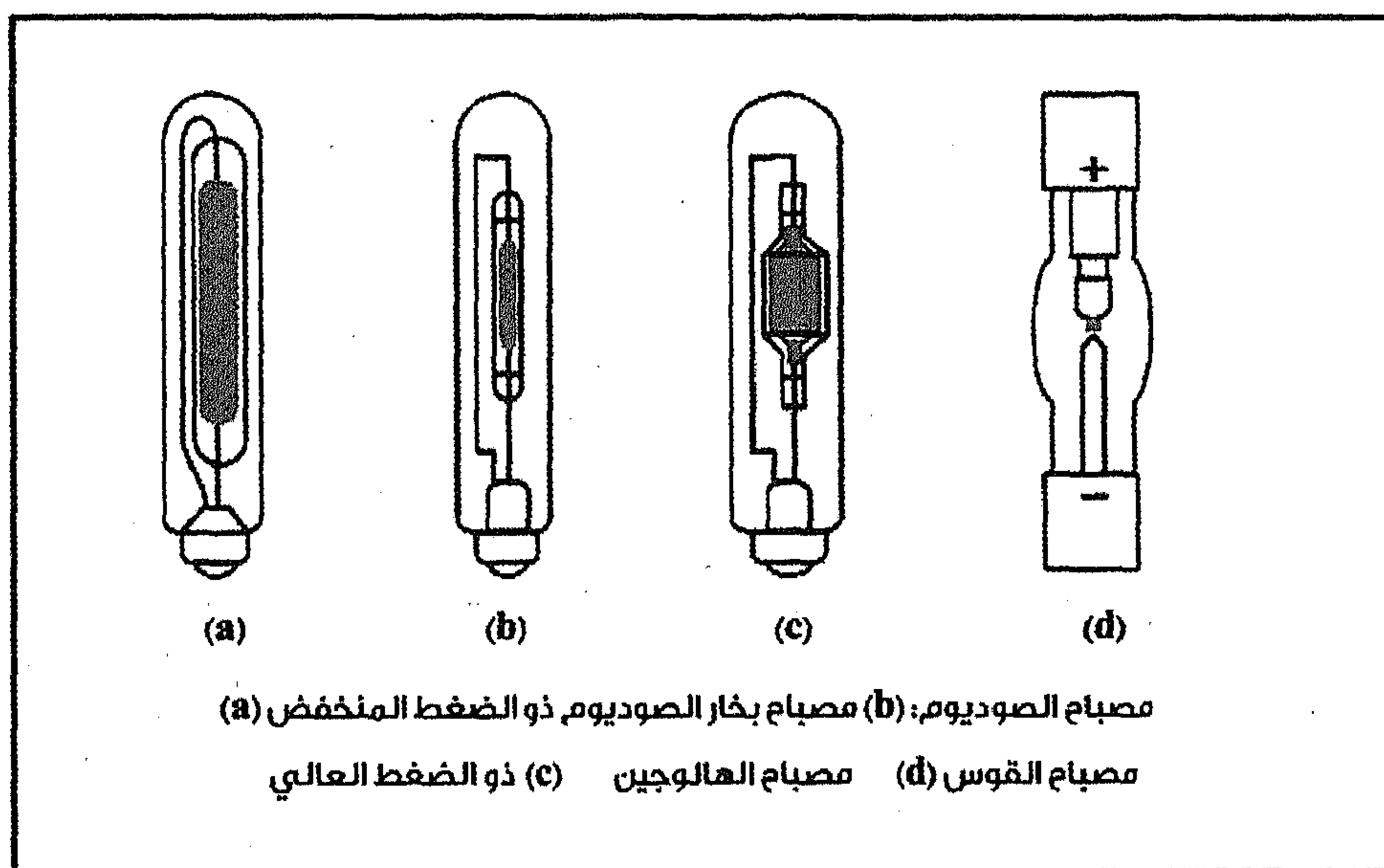
مصابيح الصوديوم منخفضة الضغط : تتألف مثل هذه المصابيح من أنبوبين زجاجيين أحدهما داخل الآخر. يحتوي الأنبوب الداخلي على صوديوم صلب ومزيج من غازي النيون والأرجون. وعند إشعال المصباح في البداية فإنه يبعث ضوءًا برتقاليًّا مائلًا إلى الاحمرار متطابقًا مع خصائص غاز النيون. ولكن كلما سخن الصوديوم، فإنه يتبخر ويصبح الضوء بعد ذلك أصفر اللون.

مصابيح التفريغ الغازي عالية الضغط: تستخدم مثل هذه المصابيح الزئبق أو مركبات معدنية أو مركبات كيماوية أخرى تحت ضغط عالٍ من أجل إنتاج الضوء. وتُسمَّى هذه المصابيح أيضًا مصابيح التفريغ عالية الشدة، وتضم مصابيح بخار الزئبق ومصابيح الهاليد الفلزية ومصابيح الصوديوم عالية الضغط (شكل 12). جهد اللمبة يزداد لأنه كلما زادت قيمة التيار ازداد الضغط وبالتالي يزداد تدرج الجهد إلى القيمة العظمى، وبعدئذ يقل إلى قيمة التوازن عند النقطة C (الشكل 13).

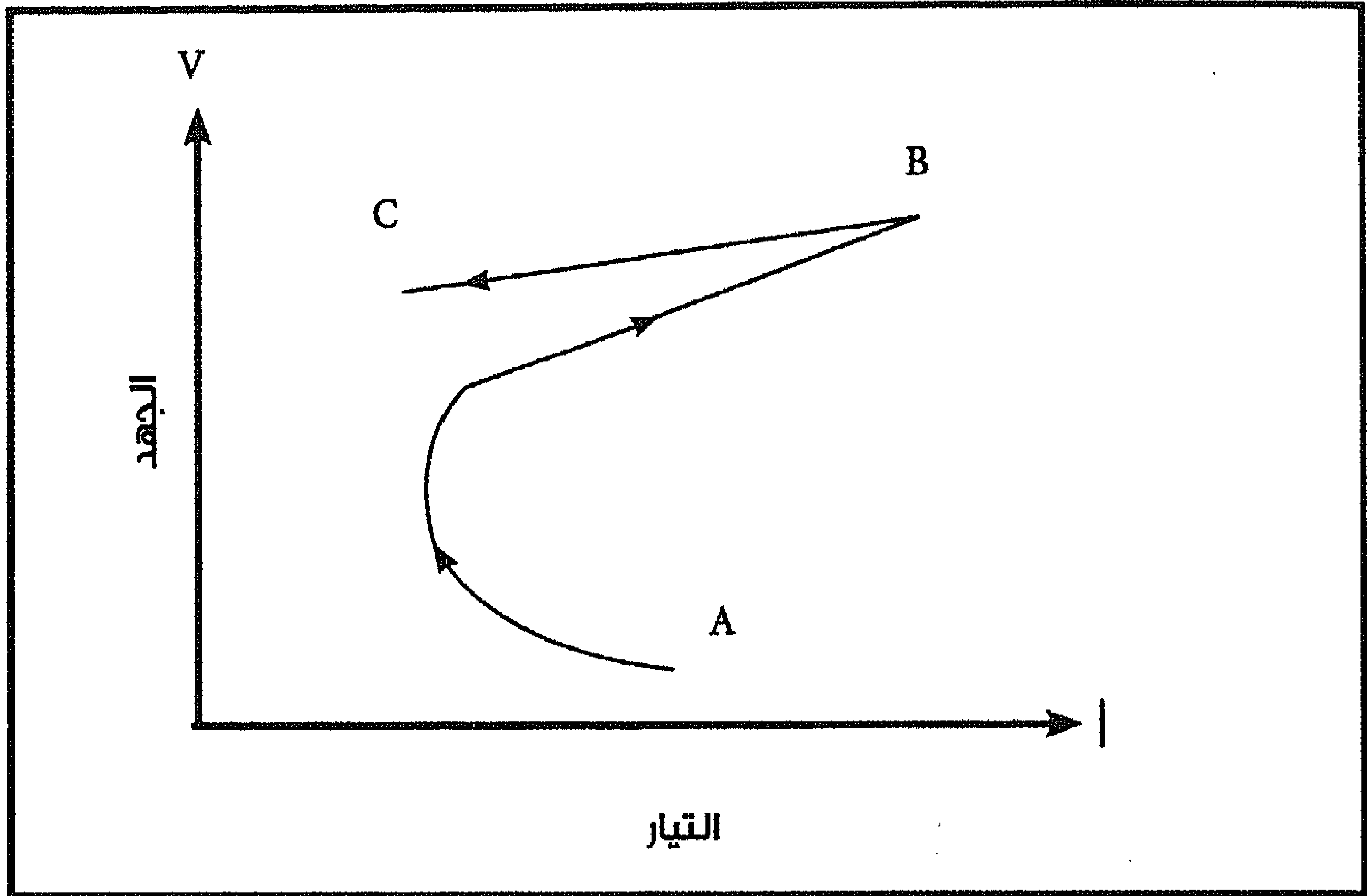
مصابيح بخار الزئبق : ولها زجاجتان إحداهما داخل الأخرى. وتُسمى الزجاجة الداخلية ـ وهي مصنوعة من الكوارتز ـ الأنبوب القوسي، أما الزجاجة الخارجية فتقوم بحماية الأنبوب القوسي. ويحتوي الأنبوب القوسي على البخار الزئبقي تحت ضغط أعلى مما يوجد في المصباح الفلوري؛ وبذا فإن المصباح البخاري هذا يستطيع إنتاج الضوء دون الحاجة إلى طلائه بمادة فسفورية. وينبعث من البخار الزئبقي ضوء أزرق اللون مائل إلى الاخضرار إضافة إلى الأشعة فوق البنفسجية. وإذا كان مصباح بخار الزئبق مصنوعًا من زجاجٍ صافٍ فإنه لا ينتج ضوءًا أحمر، وبذا فإن الأجسام الحمراء تبدو معه بنية اللون، أو رمادية، أو سوداء. أما مصابيح بخار الزئبق التي يُغَطَّى فيها سطح الزجاجة الخارجية بمادة فسفورية فإنها تقوم بإنتاج ضوء ذي عدة ألوان؛ إذ إن مادة الفسفور تبعث ضوءًا أحمر عندما تقع عليها الأشعة فوق البنفسجية. وتُعمّر مصابيح بخار الزئبق أكثر من غيرها من المصابيح ذات القدرة المماثلة، ولكن هذه المصابيح تتطلب زمنًا يبلغ نحو خمس إلى سبع دقائق لبناء ضغط البخار الزئبقي والوصول إلى سطوع كامل للضوء.

مصابيح الهاليد الفلزية : تحتوي هذه المصابيح على مركبات كيماوية من أي فلز مع الهالوجين. وتعمل مثل هذه المركبات على إنتاج ضوء متوازن من ألوان الضوء الطبيعي أكثر مما يتوافر في حالة مصابيح بخار الزئبق، ودون الحاجة إلى استخدام مادة فسفورية. كذلك فإن هذه المصابيح تتمتع بحياة طويلة، وإنتاج ضوء عال، مقابل كل وات من القدرة. وتُعدّ هذه المصابيح مثالية للاستعمال الخارجي وأحيانًا داخل المنازل.

مصابيح الصوديوم عالية الضغط : تشبه هذه المصابيح مصابيح بخار الزئبق، لكن أنبوبها القوسي مصنوع من أكسيد الألومونيوم بدلًا من الزجاج أو الكوارتز. وتحتوي على مزيج صلب من الصوديوم والزئبق إضافة إلى غاز نادر. وينبعث من المصباح ضوء برتقالي أبيض يعمل على إكساب الألوان الزرقاء والخضراء نوعًا من الدّكنة، كما أنه يحوِّل اللون الأحمر إلى لون برتقالي. ولهذا المصباح حياة طويلة وكفاءة ضوئية عالية.



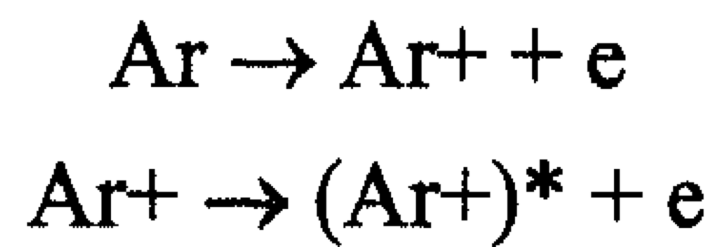
الشكل (12): لمبات التفريغ ذات الشدة العالية



الشكل (13): الجهد والتيار في لمبة التفريغ ذات الضغط العالي أثناء تسخينها

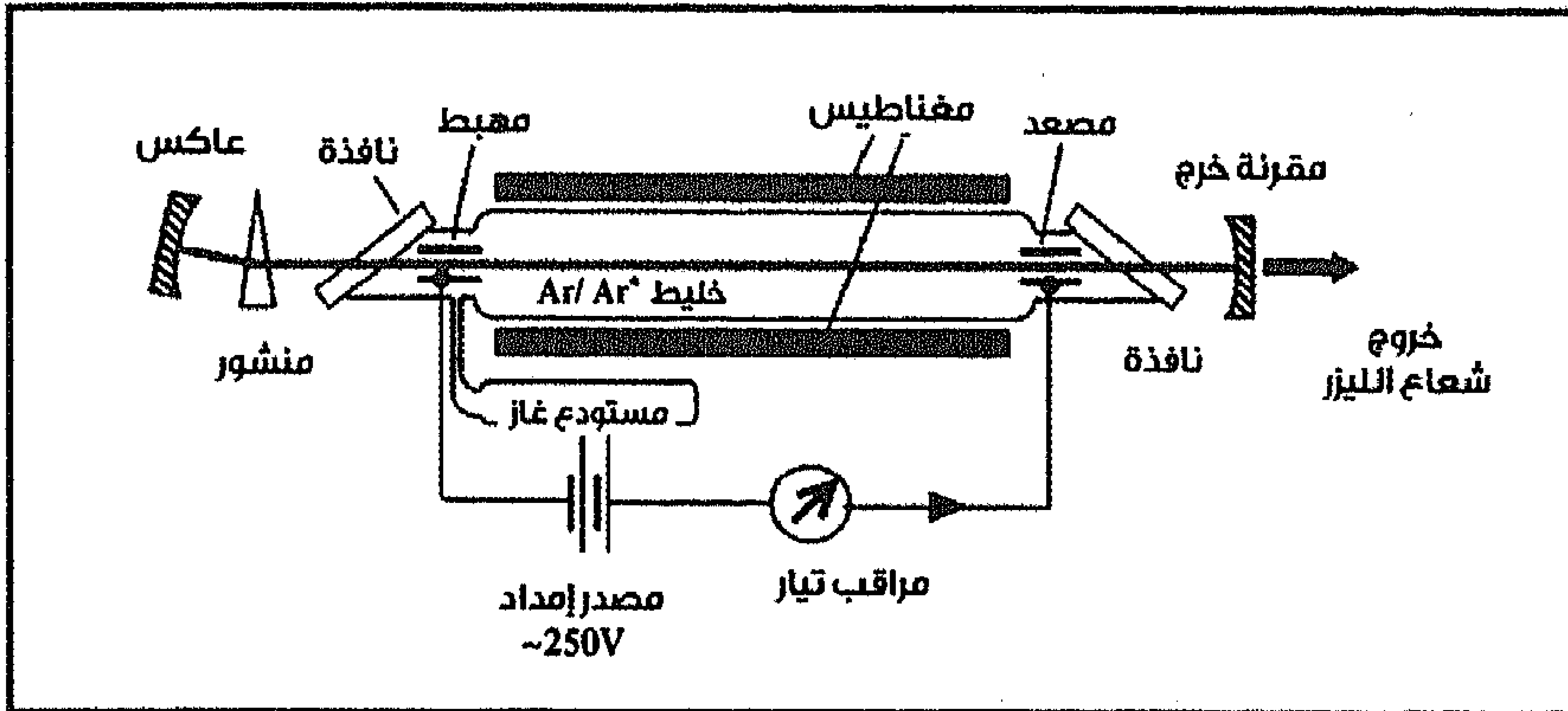
الليزر الأيوني :

الليزرات الأيونية تستخدم الانتقالات الأيونية بدلًا من انتقالات الإثارة، مثل الليزر هليوم- نيون، وتتطلب طاقة أكبر بكثير لإثارة انتقال الأيون، وهي عموما أكبر من 10eV. يوجد عدة أنواع مختلفة من الليزرات الأيونية المتوفرة تجاريًّا، بما في ذلك الأرجون والكريبتون والهليوم والكادميوم وبخار النحاس. طاقة انتقال التأين العالية تتيح الحصول على نواتج أطوال موجية قصيرة. تتطور الانبعاثات ليزر أيون الأرجون التي تعتمد على الأيونات المثارة بتفريغ قوس الضغط المنخفض. العملية ذات مرحلتين هما التأين متبوعا بالإثارة:



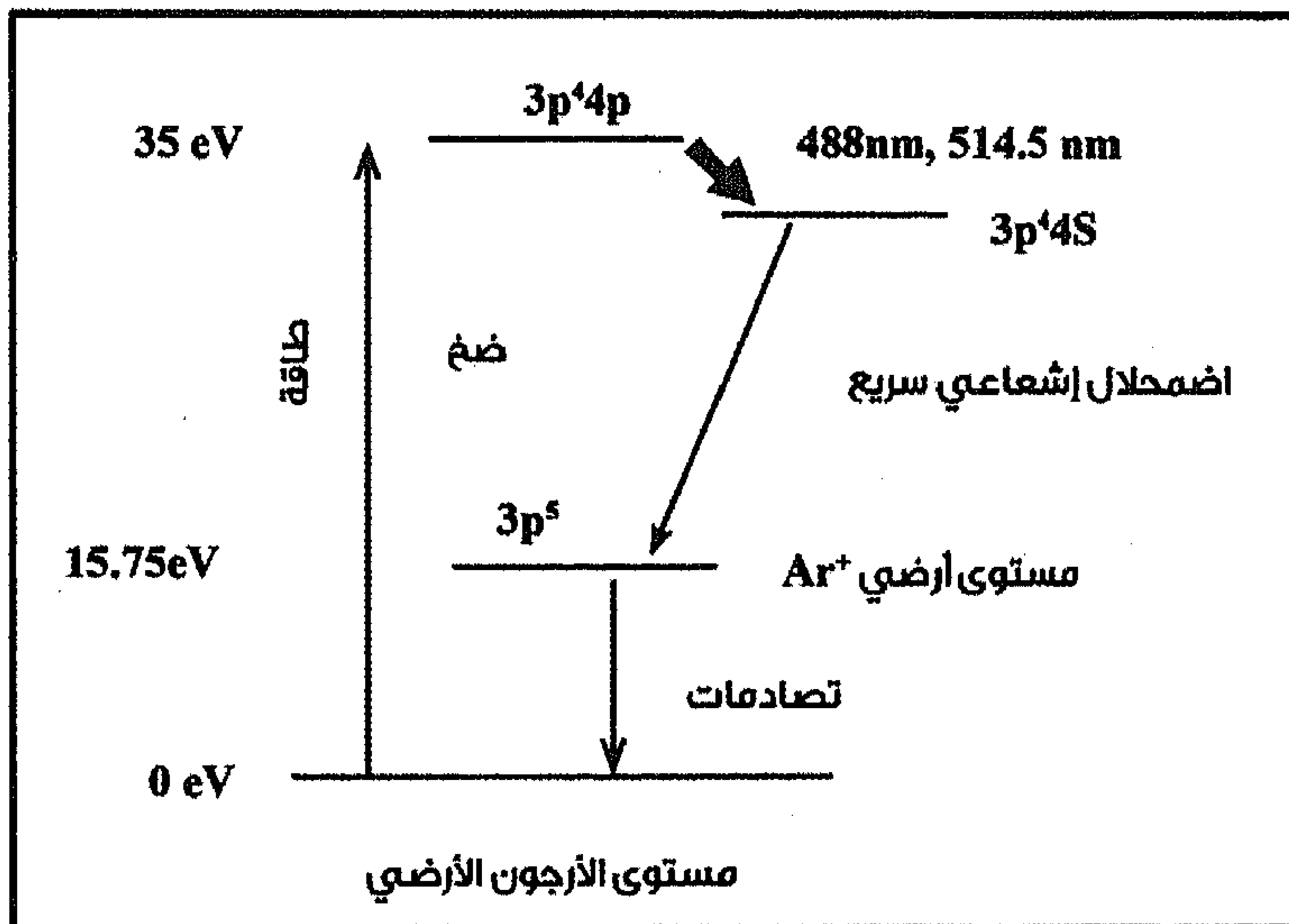
$$Ar \rightarrow Ar+ + e$$
$$Ar+ \rightarrow (Ar+)^* + e$$

تشييد الليزر (شكل 14) مماثل لليزر هليوم- نيون لكن الليزرالأرجوني يعمل عند ضغط جزئي أعلى من الهليوم من حوالي 800 باسكال (6 ملليمتر زئبقي) مع قدرة خروج من 5 إلى 50 مللي وات بأطوال موجية 325 و 441 نانو متر وكفاءات حوالي 0.05٪. الشكل (15) يوضح عملية الانتقالات خلال مستويات الطاقة المختلفة لليزر الأرجواني.



الشكل (14): ليزر أيون الأرجون

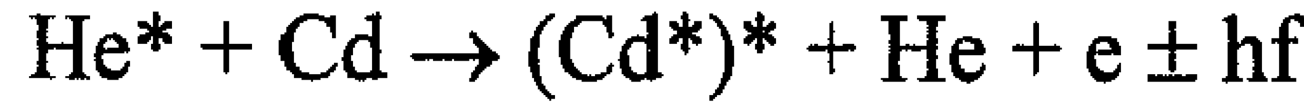
$$Ar^+ - \text{(ground state)} + \text{high energy electrons} \Rightarrow Ar^+ - \text{(excited state)} + \text{lower energy electrons.}$$



الشكل (15): عملية الانتقالات خلال مستويات الطاقة المختلفة لليزر الأرجواني

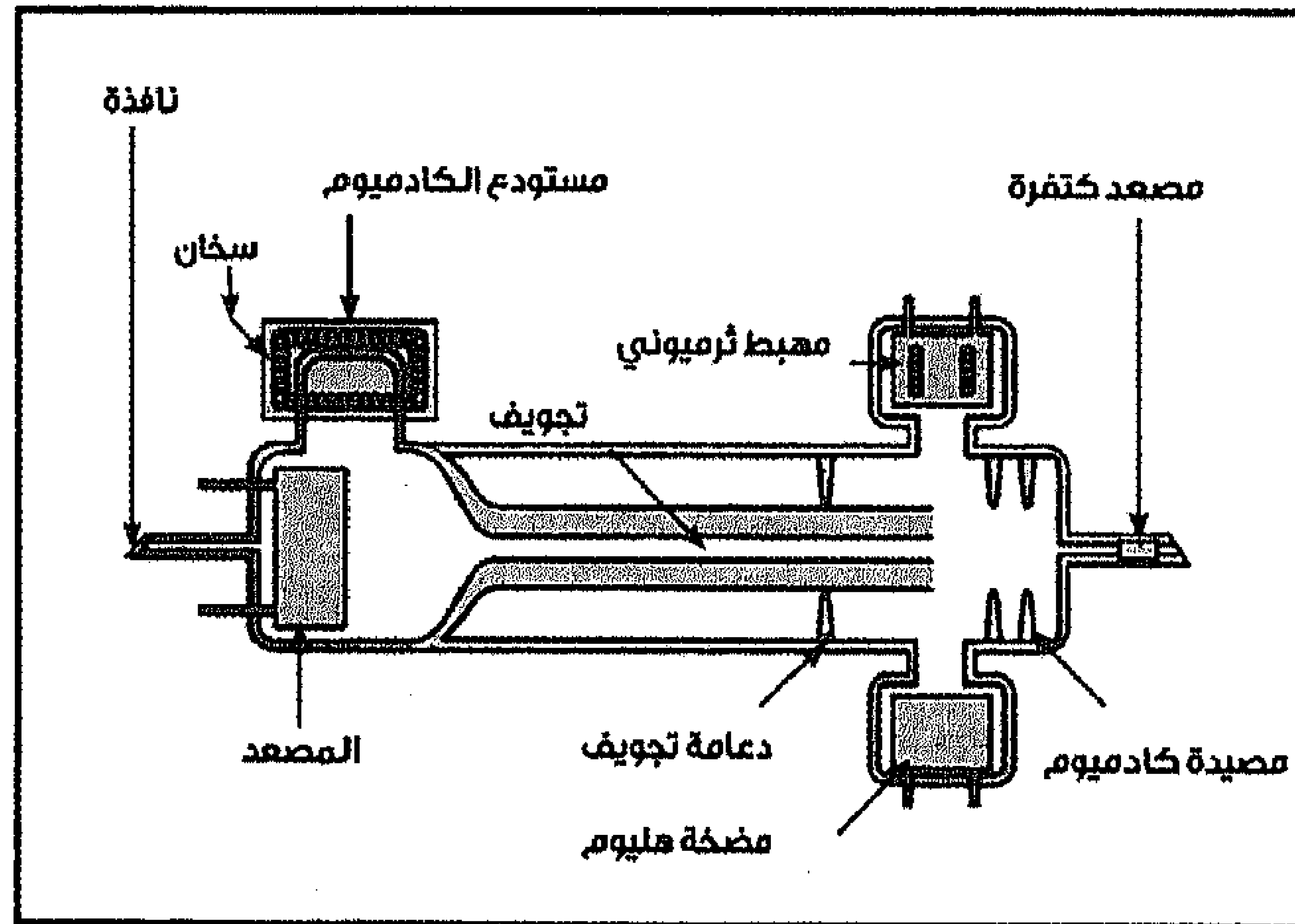
يستخدم مجال مغناطيسي محوري شدته حوالي 0.1 تسلا للحصول على تقارب كافٍ للبلازما في محاذاة التجويف الأنبوبي، ولكن المجال يقل عن 0.01 تسلا عند الكاثود حيث إن كثافة التيار عند جذر القوس لا يسبب بصقًا مفرطًا وضررًا للكاثود. المجال المغناطيسي يسبب حركة دوامة للجزيئات الموصلة مع مركبة السرعة النصف قطرية. ويمكن إنتاج المجال المغناطيسي بمغناطيس دائم أو مع ملف حلزوني. أنبوبة الليزر تحتوي على غاز أرجون بضغط 26.6 باسكال وقطرها 3 مم وطولها 0.6 متر. عملية إثارة الأيون تتطلب كثافة تيار حوالي 10 أمبير لكل ملليمتر مربع عند جهد تشغيل مقداره 35 - 100 V DC ونتيجة لتشغيل ليزر الأرجون بقدرة عالية أكبر من 3 وات فإنه يتطلب بالضرورة تبريدًا مائيًا. قدره خروج شعاع الليزر تصل إلى 30 وات لمدى طول موجي 458 - 575nm عند كفاءة كمية حوالي 0.05 ٪.

ليزر هليوم – كادميوم يستخدم انتقالات تأين من بخار الكادميوم. الشحنات الموجبة لأيونات بخار الكادميوم تهاجر تجاه الكاثود ولكن تكثف في مصيدة باردة قبل الوصول إليه، ويحدث تفاعل Penning بين ذرات الهليوم شبه المستقرة والكادميوم الذري هي :



$$He^* + Cd \rightarrow (Cd^*)^* + He + e \pm hf$$

الشكل (16) يوضح رسمًا تخطيطيًا لليزر هليوم – كادميوم :



الشكل (16): ليزر هليوم – كادميوم

الهيدروديناميكا المغناطيسية (MHD) :

الهيدروديناميكا المغناطيسية تهتم بدراسة سلوك المائع والغازات الموصلة كهربائيا، مثل: المعادن المنصهرة والغازات المتأينة، عندما تجري في منطقة تخضع لمجالات كهربائية ومغناطيسية. وبما أنه يشمل مائعًا وغازات فهو يسمى أحيانًا «ميكانيكا الموائع المغناطيسية» وأحيانًا أخرى علم الموائع مغناطيسية. وتتناول تطبيقات هذا العلم فروعًا كثيرة، ففي الفلك يساعد على فهم ما يحدث داخل الشمس من نشاطات تؤدي إلى ظهور البقع الشمسية الدورية، وكذلك ما يحدث داخل النجوم الأخرى خلال دورة حياتها، وفي الجيولوجيا، يُسلط الضوء على المحرك الأرضي في اللب وما ينجم عنه من خواص مغناطيسية وميكانيكية، ويبحث هذا العلم أيضًا في توليد الطاقة الكهربائية مباشرة من الغازات الحارة المندفعة المتأينة في المولّدات generators التي تعتمد هذه الحركية المغناطيسية. كما يبحث في تتبع ما يحدث في الاندماج النووي، وذلك عند تسليط طاقة كهرومغناطيسية عالية جدًّا على حبابة من الديتريوم والتريتيوم في المختبر، لتقليد ما يحدث داخل الشمس، وفي المفاعلات النووية التي تستعمل معدن الصوديوم المصهور مبردًا فيه، وقد يكون أبرز تطبيقاته في دراسة البلازما عند محاولة حصرها في منطقة بعيدة عن جدران الحاوية بوساطة المجالات المغناطيسية، ليتسنى رفع درجة حرارتها وضغطها إلى قيم تقارب القيم المقابلة لها داخل النجوم.

مولدات MHD تشبه المولدات الكهربائية التقليدية. والفرق الوحيد هو أنها تستخدم مائعا موصلا كهربائيا بدلا من الموصلات الصلبة لتوليد الطاقة الكهربائية. أساسا، ديناميكا الموائع المغناطيسية هي منطقة بحثية تشتمل على دراسة حركة المائع الموصلة كهربائيا مثل البلازما والمياه المالحة.

مولد MHD بسيط يتكون من فوهة الغاز هي عبارة عن غرفة احتراق يضخ فيها نبضة من الغاز في قناة / مجرى. جدران القناة تعمل باعتبارها قطبًا. ويتم تغذية التيار الكهربائي المستحث لتغذية الأحمال من قبل الدوائر الخارجية التي تزود الكهرباء المولدة إلى الوجهة

المطلوبة. ويمكن بناء مولدات MHD بتصميمات مختلفة مثل مولد فاراداي، ومولد قاعة القرص. وكان فاراداي أول من صمم مولد MHD. وقدم من قبل مايكل فاراداي في عام 1831 حيث استخدم أقراصًا نحاسية ومغناطيسًا على شكل حدوة حصان لتوليد الكهرباء.

تحت ظروف الضغط العالي، يتم إنتاج الغاز الموصل كهربائيا من خلال حرق الوقود الأحفوري. معظم نظم MHD تستخدم الغاز الطبيعي والفحم أو الوقود الأحفوري. من ناحية أخرى، تستخدم الغازات الخاملة مثل الأرجون والهليوم في بعض نظم MHD. يتم تمرير الغاز من خلال الفوهة بسرعة فائقة تصل من 1000 إلى 2000 متر في الثانية الواحدة. مولدات MHD لا تخلق شحنة كهربائية، بل إنها كامنة في المائع أو الغازات المؤينة. يمكن زيادة التوصيلية للمائع من خلال الاعتماد على أساليب مختلفة، فمثلا إذا كان المائع هو غاز خامل، فمن الممكن إضافة كميات مناسبة من كربونات البوتاسيوم.

الغاز يدخل القناة أو المجرى حيث يتم تطبيق مجال مغناطيسي قوي بمساعدة مغناطيس فائق التوصيل. كثافة القوة المغناطيسية أو المجال المغناطيسي داخل القناة عادة يصل إلى ما بين 3-5 تسلا. كلما مر الغاز عبر القناة، فإنه يعاني قوة دافعة كهربية. كيف تنشأ هذه القوة؟ وفقا لقانون فاراداي في تيار/ جهد الحث الكهرومغناطيسي (القوة الدافعة الكهربية) هي التي تستحث في سلك / ملف متى يكون هناك تغيير في وصلية الفيض المغناطيسي مع الملف. هنا، المغناطيسيات الكهربية ثابتة والمائع الموصل يتحرك باستمرار. وهذا يتسبب في توليد مجال كهربي.

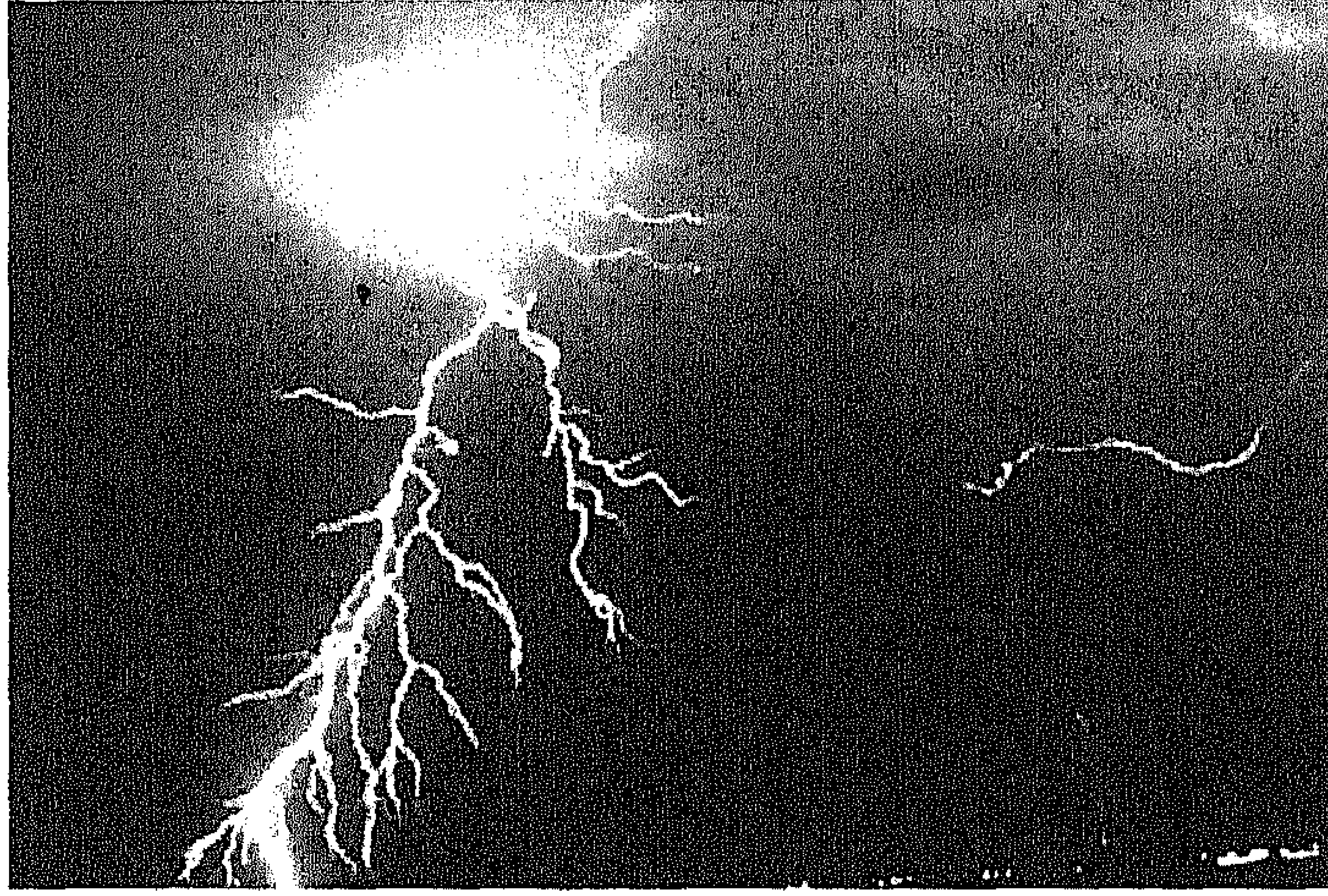
والأهمية العملية للهيدروديناميكا المغناطيسية حاليا أنها تلعب دورا رئيسيا في الجهود القائمة من أجل توليف والتحكم في **الطاقة الهيدروجينية** بغرض إنتاج **الطاقة الكهربائية** في المستقبل. وهذه الطريقة تُغني عن استخدام **المفاعلات النووية** لإنتاج الطاقة.

الظواهر الطبيعية :

البرق :

البرق هو الضوء المبهر الذي يظهر فجأة في قلب السماء في الأيام التي تسوء فيها أحوال الجو، وهو الضوء الناشئ نتيجة تصادم سحابتين إحداهما تحمل الشحنة الكهربائية السالبة والأخرى تحمل الشحنة الكهربائية الموجبة، بذلك ينتج عن التصادم شرارة قوية تصدر على هيئة الضوء الذي نراه فجأة، كما أن هذا الضوء يعقبه صوت عالٍ قادم من السماء وهو ما يسمى بالرعد، والاثنان معًا يطلق عليهما اسم الصاعقة. ترفع ضربة البرق درجة حرارة الهواء بشكل متزايد للأماكن المتاخمة. ويقوم حينها بضغط المناطق المحيطة بالضربة وينتج موجة صدمة (shock wave) أسرع من الصوت، وتضمحل إلى موجة صوتية وتُسمع وتسمى بالرعد. تبلغ سرعة البرق بضع عشرات إلى مئات من الكيلومترات في الثانية الواحدة، قد تصل إلى 250 كيلومترًا في الثانية للقائد و 100 ألف كيلومتر في الثانية للدارة المقصورة الراجعة من الأرض.

الشكل (17) يبين صورة لإحدى الصواعق حيث يحدث تفريغ كهربي بين السحاب المشحون كهربيا والأرض. والسبب في اكتساب السحاب لشحنة كهربية هو تصادم حبيبات بخار الماء بعضها البعض واحتكاكها المستمر، مما يترتب عليه انتقال بعض الإلكترونات من حبة إلى حبة، فتصبح واحدة غنية بالإلكترونات (سالبة كهربيا)، والأخرى موجبة كهربيا. وبتجمع مجموعات كبيرة من الحبات ذات الشحنة الواحدة تحت تأثير الظروف الجوية يصبح بينها فارق هائل في الجهد الكهربي، والذي يؤدي إلى التفريغ الكهربي (التفريغ الكهربي هو انتقال الشحنة الكهربية المفاجئ واللحظي بين جسمين لهما فارق في الجهد الكهربي) بين تلك التجمعات وظهور البرق، أو بينها وبين الأرض.



الشكل (17): صورة لإحدى الصواعق

تكون سرعة الذيل الأسفل التي تغادر سحابة إلى الأرض أكثر من غيرها عادة، مع ذلك لا زالت أقل بكثير من سرعة الضوء. لما كانت عملية التفريغ محتوية على إلكترونات تم فصلها عن ذراتها فإنها تتسارع تحت تأثير المجال الكهربائي الناجم عن فرق الجهد الكهربائي بين السحابة والأرض. تصطدم هذه الإلكترونات بجزيئات وذرات أخرى في طريقها محررة إلكترونات أخرى، مخلفة بالتالي قناة من الهواء المتأين.

من ناحية أخرى فإن هذه العملية لا تتم دفعة واحدة وإنما على دفعات متتالية. كما أن هناك فترة توقف تبلغ حوالي 50 ميكروثانية بين كل مرحلة والتي تليها. عند اقتراب الشحنات من الأرض يحدث التحام بينها وبين الشحنات الصاعدة من الأرض مكونة قصرًا في الدائرة. تبلغ سرعة عودة البرق من الأرض نحو المنطقة المتأينة سرعات عالية قد تصل إلى ثلث سرعة الضوء، مخلفًا الجزء الأعظم من الضوء الوهاج.

وقد يرى أحيانًا على أطراف أجنحة الطائرات في أثناء العواصف الكهربائية. فالسحب في هذه العواصف تحمل في أسفلها شحنات كهربائية كثيفة تشحن أطراف

الطائرات العابرة بالتأثير، ويتم التفريغ الكهربائي بين شحنة السحابة وشحنة الأطراف المخالفة بتوهج أزرق ساطع. ومن التأثيرات التي تسببها الصواعق أحيانًا ضرب شبكة التوزيع الكهربائي. فأبراج حمل الخطوط المدببة العالية مستهدفة لمثل هذه التفريغات الكهربائية، وعندما تضرب الصاعقة أحد هذه الأبراج أو الأعمدة تشتد الفولطية إلى درجة تنهار معها عوازل البرج بوميض توهجي شديد يذيب الأسلاك، ولا بد حينئذ من قطع التيار الكهربائي عن ذلك الجزء من شبكة التوزيع إلى حين إصلاحه.

الشفق القطبي :

تغمر الرياح الشمسية الأرض باستمرار، وتكون تياراتها من البلازما الساخنة المتخلخلة (وهي غازات من الإلكترونات الحرة والأيونات الموجبة) المنبعثة من الشمس نتيجة لحرارة طبقتها الخارجية التي تصل إلى مليون درجة مئوية فتنطلق في كل الاتجاهات. تكون سرعة الرياح الشمسية 400 كم/ث عندما تصل إلى الأرض، وكثافتها $5ion/cm^3$ وشدة المجال المغناطيسي تصل إلى 2– 5 نانوتسلا.

ينشأ المجال المغناطيسي البيكوكبي على الشمس ومرتبطا بحقول بقع الشمس، ثم تسحب الرياح الشمسية خطوط قوته إلى الخارج. وهذا من شأنه أن يوجهه مباشرة من الشمس إلى الأرض، لكن دوران الشمس يميله عند وصولها الأرض بنحو 45 درجة؛ لذلك فقد تبدأ خطوط المجال المغناطيسي بعبور الأرض بالقرب من الحافة الغربية للشمس الظاهرة للعيان.

عندما تكون الرياح الشمسية مشوشة فإنه سيكون من السهل نقل الطاقة والمواد إلى الغلاف المغناطيسي، فتنشط الأيونات والإلكترونات في ذات الغلاف ثم تتحرك على طول خط المجال المغناطيسي إلى المناطق القطبية من الغلاف الجوي.



الشكل (18) صورة للشفق القطبي فوق منطقة بكندا

ظاهرة نار سانت إلمو :

ظاهرة نار سانت إلمو هي ظاهرة كهربائية تكونت من بلازما مضيئة من إفرازات إكليلية منشؤها جسم مؤرض (جسم متصل بالأرض). غالبا ما تعرف كرة البرق خطأً بأنها نار سانت إلمو، ولكنهما ظاهرتان منفصلتان عن بعضهما البعض ومتمايزتان، ومع أنه يطلق عليها «نار» إلا أنها مجرد بلازما، وتعتبر مظهرًا من مظاهر كهرباء الغلاف الجوي عند النظر إلى هذا السياق. وعادة تظهر عند حدوث عاصفة رعدية وعلى قمم الأشجار والأبراج وغيرها، وأحيانا على رؤوس الحيوانات كفرشاة أو نجمة مضيئة.

يتسبب المجال الكهربائي لجسم ما في تأين جزيئات الهواء المحيطة به، فينتج توهج خافت يمكن رؤيته في الإضاءة المنخفضة. ولكي نتتج نار سانت إلمو فإنه يجب أن يكون هناك من 1000 إلى 30000 فولت لكل سنتيمتر، ولكن هذا الرقم يعتمد اعتمادا كبيرا

على الشكل الهندسي للجسم. فالأجسام الحادة تحتاج إلى كمية فولتات أقل لإعطاء النتيجة نفسها؛ وذلك لأن المجالات الكهربائية تتركز في مناطق الانحناء الشديد، وبالتالي فإن التفريغ يكون أكثر كثافة في النهايات المدببة لتلك الأجسام التي تظهر كلا من نار سانت إلمو مع الشرر العادي عندما يؤثر الجهد الكهربائي العالي على الغاز. ويمكن رؤية تلك النار في العواصف الرعدية عندما تشحن الأرض أسفل العاصفة بالكهرباء، حيث يصبح هناك فرق جهد عال في الهواء الموجود بين السحابة والأرض. فيمزق هذا الجهد جزيئات الهواء ويبدأ الغاز بالتوهج. ويتسبب نيتروجين وأكسجين الغلاف الجوي في توهج نار سانت إلمو باللون الأزرق أو البنفسجي، وهي مشابهة للآلية التي تتسبب في وهج إضاءة النيون.

توليد الكهرباء بالاندماج النووي:

تجارب الاندماج النووي أصبحت متزايدة على نطاق واسع بدرجة عالية من التعقيد التقني، التي تتطلب استثمارات مالية كبيرة. نظرًا لهذه الظروف الإطارية، لابد من تكثيف جهود التعاون الدولي. إن حجم الموارد اللازمة لفترة طويلة للغاية لإمكانية التنفيذ، مع أوجه عدم اليقين الناتجة عن ذلك، كبيرة جدًّا في التقييم قد تؤدي إلى التعقيد في القرارات المعلقة.

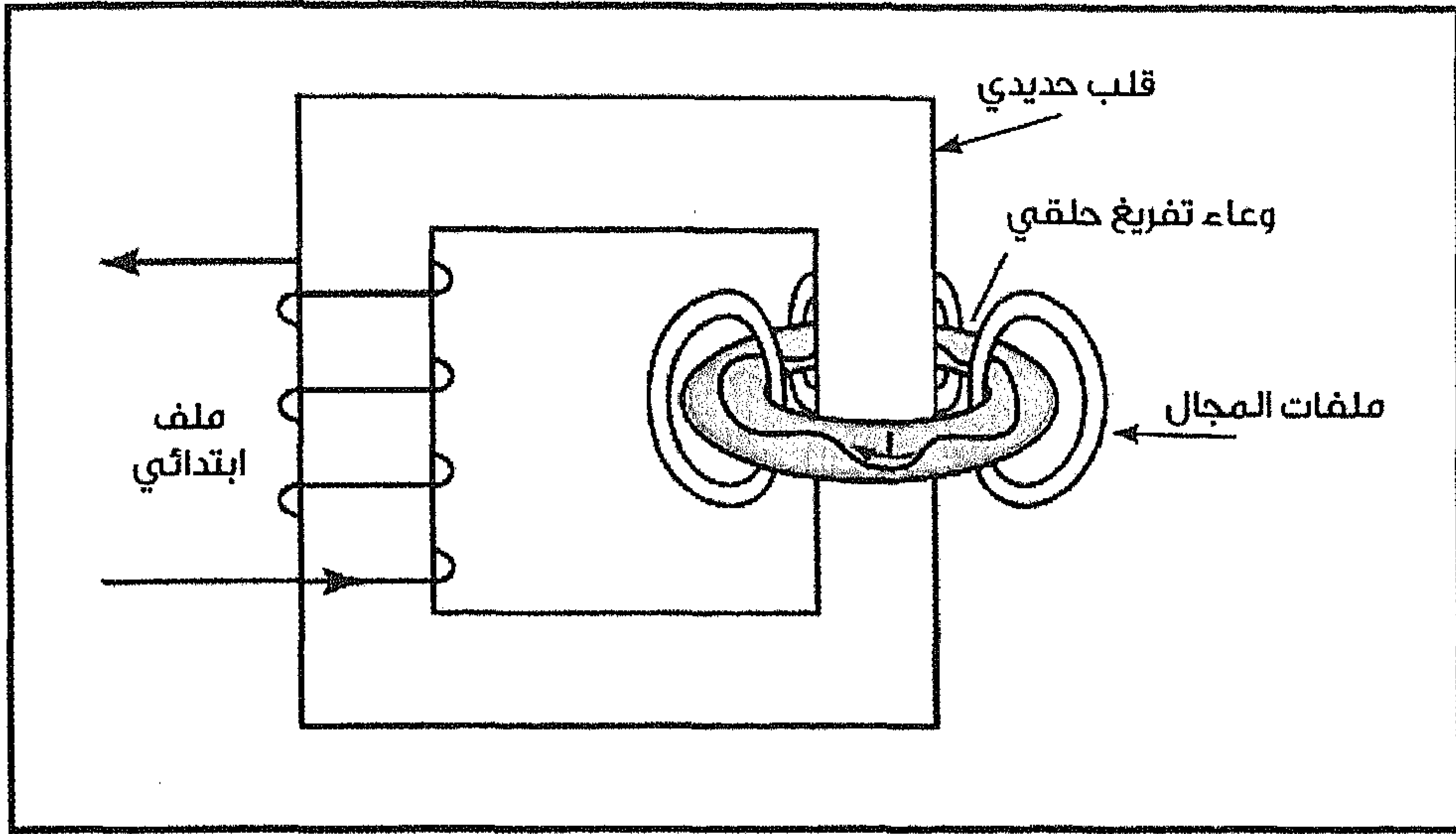
يعتقد الباحثون في الانصهار النووي أنه ينبغي مواصلة برنامج البحوث الموجهة نحو كل من: المفاعل أيتير ITER (المفاعل الحراري التجريبي الدولي) والديمو DEMO (الدليلي لمحطة الطاقة الاندماجية) للإعداد لبناء أول مفاعل انصهار تجاري في حوالي عام 2050. بالتوازي مع المفاعل أيتير، يلزم بناء مصدر نيوترون انصهاري عالي الكثافة

خاص لتطوير واختبار المواد منخفضة التنشيط. الديمو يهدف إلى إثبات الجدوى التقنية لمحطة طاقة الانصهار وتوليد الكهرباء في عملية مستمرة للمرة الأولى. ولتحقيق هذا البرنامج، يجب الإلمام الكبير جدًّا بالتحديات العلمية والتقنية للانصهار النووي.

تقريبا في تاريخ 50 سنة من بحوث الانصهار، والصعوبات التي تعترض تطوير محطة طاقة الانصهار، ومع النتائج التي تلوح في الأفق للتنفيذ، يجب أن يتم دفع المزيد والمزيد في المستقبل بأن يصبح برنامج الاندماج النووي ساري المفعول (كهدف متحرك). الانصهار النووي يمثل أيضا تحديا خاصا لتقييم التقنيات. التنبؤات الخاصة بالتأثيرات التقنية للانصهار النووي على مدى أكثر من 50 عامًا هي صعبة للغاية، وتحتاج إلى تفسير دقيق.

التوكاماك Tokomak (شكل 19) نوع من أنواع المفاعلات النووية الاندماجية، وطريقة بناء هذه المفاعلات ما زالت قيد البحث والتجربة ولم تصل إلى مرحلة الاستغلال الاقتصادي بعد. وبما أن البلازما ذات درجة حرارة عالية جدا فإنه يجب فصلها وإبعادها وجعلها لا تلامس مكونات المفاعل، وإلا أتلفته ويؤدي ذلك إلى انقطاع التفاعل الاندماجي.

يتم في المفاعلات المشيدة على طريقة توكاماك جعل البلازما تطفو وسط المفاعل دون أن تلامس أيا من أجزائه عن طريق مجالات مغناطيسية تحافظ على البلازما في مسار دائري. في الوقت الراهن تتمثل الصعوبات أمام هذا النوع من المفاعلات في الحفاظ على تواصل التفاعل الاندماجي، أي على حرارة البلازما حيث إن اختلاف السرعة في طبقات البلازما الداخلية والخارجية يسبب تداخلات تقلل من درجة الحرارة مما يتطلب جعل المجال المغناطيسي أو القوة المغناطيسية في شكل لولبي. ويتم ذلك من خلال ضخ تيار كهربائي في البلازما يساهم في رفع درجة حرارتها بغض النظر عن تقليل الخسائر الناتجة عن التداخلات. أيضا تبريد المفاعل لا يسمح بتشغيل متواصل له بل فقط بعمل متقطع نبضي.



الشكل (19): رسم تخطيطي لنظام التوكاماك

كل هذا أدى إلى أنه في أفضل الأحوال يمكن فقط استرداد كمية الطاقة التي تصرف لتشغيل المفاعل أي لا يصلح لإنتاج الكهرباء. بعض المفاعلات التجريبية في المستقبل تريد أن تبرهن على إمكانية إنتاج طاقة أكبر من تلك اللازمة لتشغيلها (شكل 20).

التوكاماك هو اختصار من الكلمات الروسية التي تعني غرفة حلقية بملفات مغناطيسية، يتكون من ثلاثة أجزاء رئيسية :

- محول كبير وهو مسئول عن توليد التيار الكهربي في البلازما، وبالتالي القدرة الأومية هي P = IRplasma وهذه القدرة تعمل على تسخين البلازما.
- وعاء البلازما الذي يعمل كملف ثانوي.
- ملفات لحصر البلازما بالمجال المغناطيسي الحلقي toroidal بالإضافة إلى توليد مجال مغناطيسي سمتي في وعاء البلازما، ويعطى بالعلاقة :

$$B_{poloidal} \approx I / 2a$$

حيث a نصف القطر الأصغر لوعاء البلازما. وبسبب وجود محول التوكاماك فهو جهاز نبضي.

الشكل (20): إمكانية إنتاج الطاقة الكهربية باستخدام المفاعلات التجريبية

الفصل السادس

البلازما وتفريغ الضغط الجوي غير المتوازن

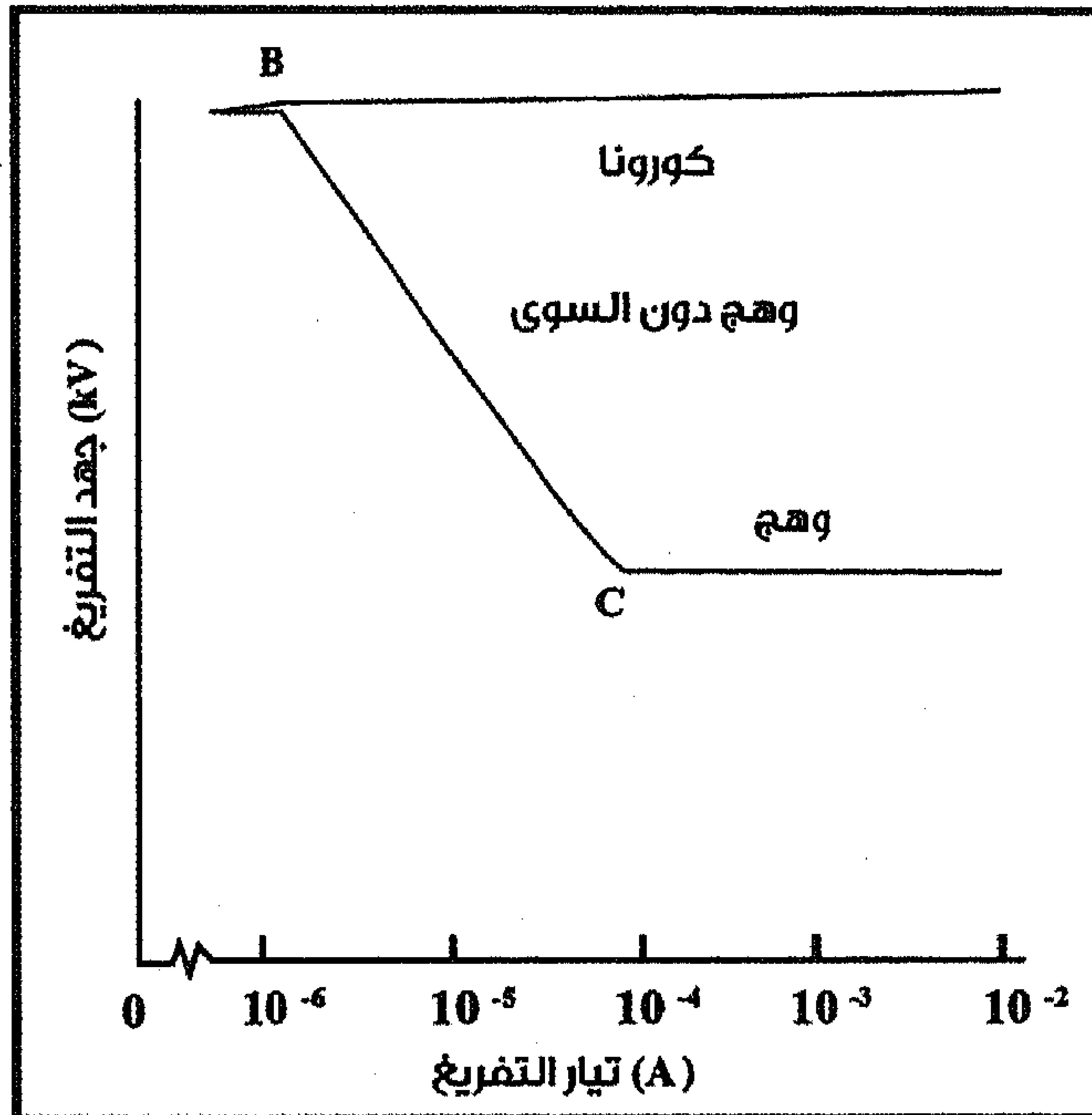
مقدمة:

تفريغات الضغط الجوي APDs تشمل التفريغ المتوهج، والإكليل، وحاجز العازل، وتفريغ الأسطح. وتفريغات الضغط الجوي ليست في حالة اتزان حراري، ويمكن استخدامها لحمل تفاعلات كيميائية مختارة غير متوازنة بمتطلبات أقل طاقة دون الاحتياج إلى جهاز تفريغ للوصول للضغط المنخفض. الكثافة العددية للإلكترونات وطاقتها غالبا ما تكون عند مستوى أعلى من البلازما في حالة اتزان حراري. أجريت دراسات حول نظم تفريغ الضغط الجوي لسنوات عديدة، وتم الاستفادة منها في العديد من التطبيقات أهمها تصنيع الأوزون لتطهير مياه الشرب والترسيب وإزالة الشحنة في عمليات ماكينات الطباعة زيروكس. إتاحة مصادر إمدادات الطاقة ذات التردد العالي بأقل تكلفة جعلت التطبيقات ممتدة في هذه المنطقة شاملة تطبيقات جديدة مثل معالجة الأسطح.

التفريغ الإكليلي والعازل يشكلان التفريغ النبضي على الرغم من أنه ليس بالضرورة أن يعملا انطلاقا من إمدادات الطاقة النابضة، لكن تحدث كنبضات سريعة بتفريغ المكثف المحلي (تفريغ العازل) أو تدرج المجال فيها يكون أعلى (الإكليل). وجود مسار التوصيل يعدل توزيع المجال ويخمد التفريغ المحلي. كثافة التيار العالي والمدة القصيرة للبقاء تمنع التفريغ من إقامة توازن الشحنة ويتطور القوس، وتمكين التفاعلات الكيميائية غير الحرارية ذات الطاقة العالية لتأخذ مكانها.

تفريغات الضغط الجوي:

خصائص تيار وجهد التفريغ موضحة في الشكل (1)، نظام التشغيل لتفريغ الهالة موضح بالفرع (B) بالشكل (1). بعض الأمثلة لتفريغات الضغط الجوي المختلفة غير المتوازنة موضحة بالجدول (1). يعتبر تفريغ الهالة وحاجز العازل والتفريغ المتوهج هما أساس التفريغ غير المتوازن عند الضغط الجوي. أيضا توجد مجموعة جزئية مثل التفريغ الدقيق والجزئي وحاجز العازل والسطح. شدة المجال الكهربي لتفريغ الإكليل عند الضغط الجوي يتغير بمحاذاة طولها والكثافة العددية للإلكترونات عالية بحدود $10^{14}\ m^{-3}$، كذلك الكثافة العددية للإلكترونات لتفريغ حاجز العازل يمكن أن تكون أعلى بحدود $10^{16}\ m^{-3}$ عند الترددات 50kHz – 20 وقطر الفتيلة 100µm وكثافة التيار $1A/mm^2$ وفترة البقاء تقدر بالنانو ثانية.



شكل (1): منطقة عدم التوازن من التشغيل لتفريغ الضغط الجوي

جدول (1): خصائص بلازما الضغط الجوي

Discharge	Discharge current (A)	Pulse length (ns)	Number of pulses per cycle	Gas temperature (K)	Pulse energy (mJ)
Dielectric barrier discharge	0.01 - 100	< 100	> 100	~ 300	< 0.1
Corona discharge	0.01 - 10	~ 50	- 51	~ 300	~ 3.3
Atmospheric pressure glow discharge	0.01 – 0.20	~ 50	– 21	< 1000	~ 2

تتميز معظم هذه الأنظمة من التفريغات بأنها نبضية والتيار اللحظي يصل لبضع عشرات الأمبيرات. والتفريغات النبضية تعتمد على تفاعل دائرة التغذية الكهربية والتفريغ.

التفريغ الإكليلي:

التفريغ الإكليلي: تفريغ غير حراري ويولد بواسطة تطبيق جهد كهربي عالٍ على الأطراف الحادة للقطب. ويستخدم بشكل عام لتوليد غاز الأوزون ومرسبات الجسيم.

تتميز منطقة تاونسند بمجالات كهربائية عالية وتيارات منخفضة (ميكروأمبير) وإمكانية الحصول على الجسيمات عالية الطاقة. على الرغم من أن متوسط المسار الحر في الهواء عند ضغط يعادل الضغط الجوي أقل من 5×10^{-8} م، فإن الإلكترونات لها طاقة كافية لكسر الروابط الكيميائية وتكوين شقوق حرة في التفاعلات الكيميائية غير الحرارية.

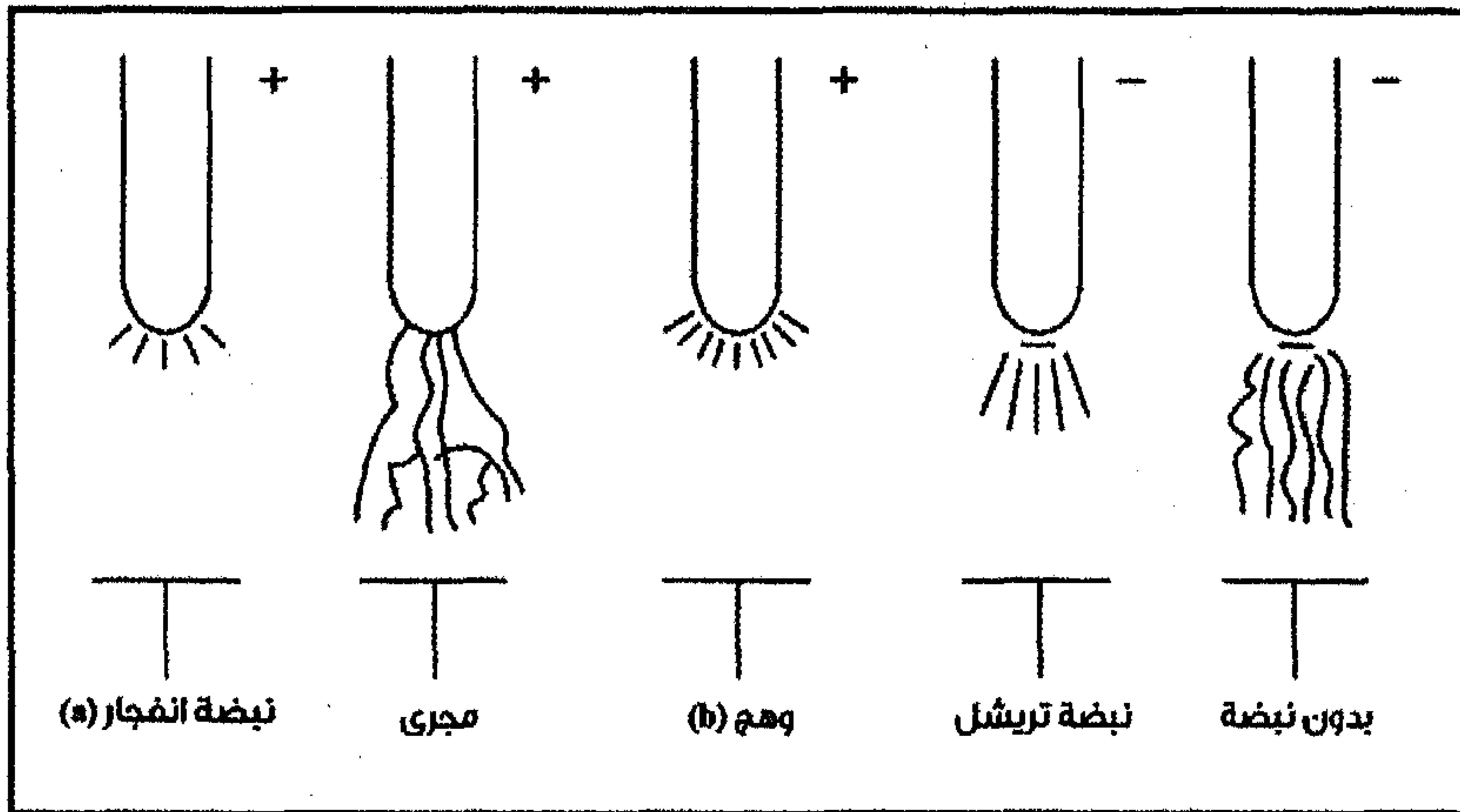
أداء الإكليل عادة محدود الشحنة الحيزية (المعادلة 1) ويزداد الجهد مع التيار حيث يكون للتفريغ خاصية المقاومة الموجبة. تنقل الأيونات المنخفضة نسبيا خارج المنطقة

المتأينة ولا يستطيع التفريغ اجتياز الفجوة بين الأقطاب نظرا لانفراج المجال الكهربي الذي يتغير تقريبا عكسيا مع المسافة من القطب.

$$E = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

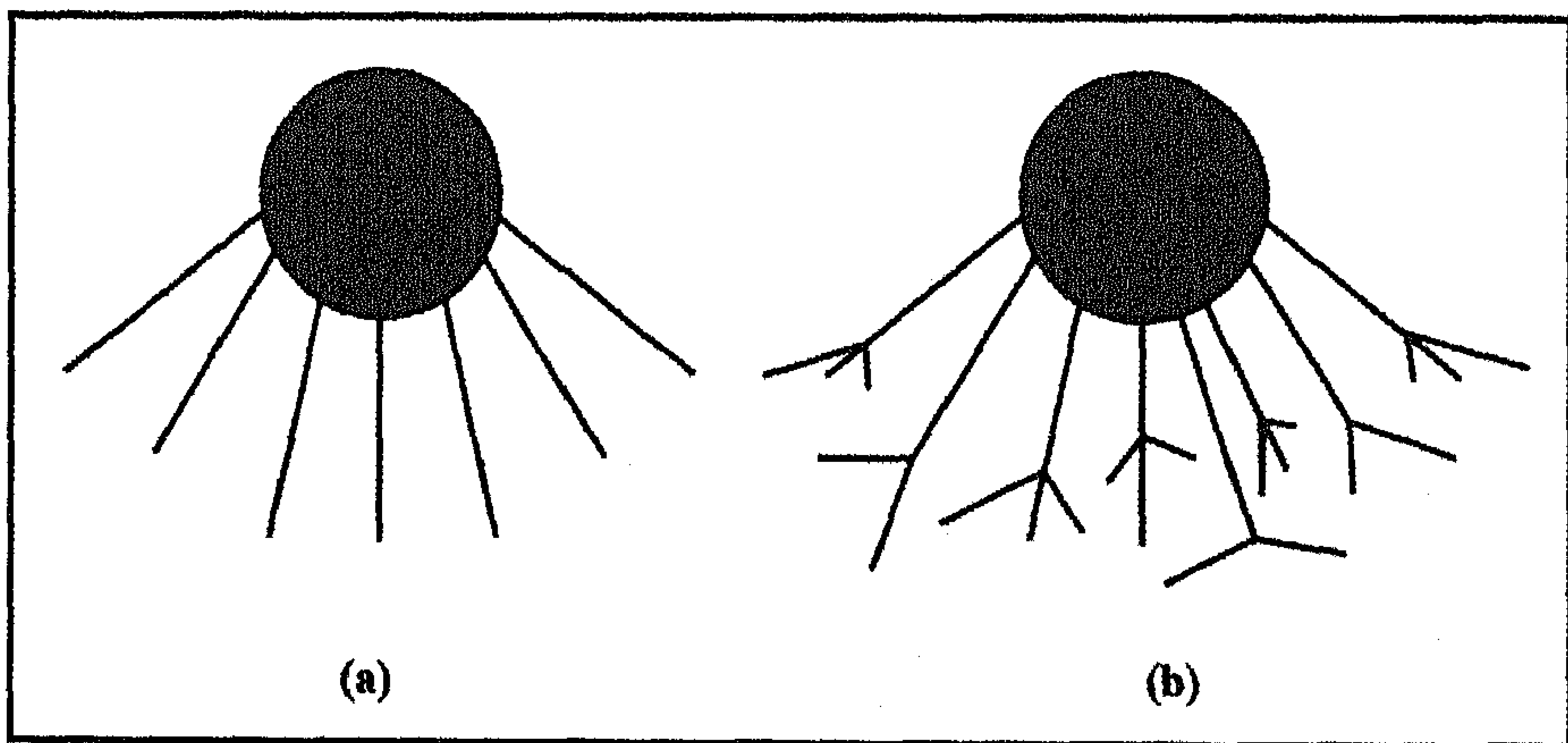
تفريغ الإكليل يأخذ اسمه من مظهر التاج مثل وهيج الغازات المتأينة المحيطة بالشمس التي نراها أثناء الكسوف الكلي للشمس. تشكل الجسيمات المشحونة غلافا من الأيونات الموجبة عند القطب الموجب، أو الإلكترونات وأيونات سالبة عند القطب السالب؛ لأن تفريغ الإكليل عادة محدود الشحنة الحيزية.

شدة المجال الكهربائي يحدث على سطح موصل في الفولطية العالية التي قطرها صغير، مثل نقطة أو سلك، الذي يعرف بالقطب الفعال ويحدد قطبية الإكليل. إذا كانت الفولطية المتوفرة عالية بما فيه الكفاية، يتم تعجيل الإلكترونات ويحدث التأين لجبهة القطب نظرًا لزيادة شدة المجال الكهربائي المحلي وتكوين التفريغ الإكليلي. يعتمد نوع الإكليل على قطبية القطب، والجهد الذي يحدث انهيار شرارة - وهندسة القطب وظروف السطح - التيار، وسواء كان هذا الغاز موجب الكهربية أو سالب الكهربية. ويبين الشكل (2) أمثلة لأشكال مختلفة من تفريغ الإكليل لقطبية مختلفة.



شكل (2): تشكيلات مختلفة من تفريغات الإكليل (a) قطب موجب (b) قطب سالب

الإكليل في القطب الموجب يبدأ التوهج بأقل ضوضاء بتيار يتحدد بظروف القطب الموجب تليها سلسلة من النبضات غير النظامية والتدفقات من القطب الموجب. التدفقات صاخبة التأثير الصوتي وتصدر ضجيج الراديو. وكلما تتم زيادة في التيار، تتطور أفرع التدفقات حتى تحدث الشرارة عند التيار العالي. التدفقات تتميز بمناطق سريعة متحركة بزيادة في شدة السطوع وكثافة التيار. أمثلة التفريغ التوهجي وتفريغ التدفق الإكليلي موضحة في الشكل (3)، على الرغم من أن الفروق ليست دائمًا محددة تحديدًا جيدا. التدفقات في التفريغ الإكليلي مماثلة لتلك التي تسبق الصاعقة (البرق) والانهيارات الكهربية الأخرى وهي مناطق محلية شديدة التأين. يتميز القطب السالب ببداية النبضات في ترددات 1– 100 كيلو هرتز وتصل إلى حوالي 150 ميكرو أمبير بزمن صعود سريع جدًا في حدود 15. نانو ثانية، المعروفة باسم نبضات تريتشيل. نبضات تريتشيل تفسح المجال للإكليل المتوهج السالب اللانبضي كلما زاد التيار، والتي بدورها، تعتمد على سطح القطب، وتحول الإكليل إلى خيوط شعرية وسرعة التحرك وإكليل صاخب قبل انهيار الشرارة في نهاية المطاف.



شكل (3): تفريغات الإكليل (a) الوهج (b) خيوط شعرية

فولطية انهيار الشرارة تكون أعلى من القطب الموجب، والقطبية السالبة تستخدم حيث يجنب الانهيار عند الفولطيات العالية مثل المرسبات الكهروستاتيكية. يتناسب انفراج شدة المجال الكهربي في التفريغ الإكليلي تقريبا عكسيا مع المسافة من القطب حتى لا يظهر التأين ويتوقف التفريغ عن النشوء.

قد ترتفع كثافة التيار لجذر القوس عند القطب (الإلكترود)؛ ومع ذلك، لا يحدث انهيار بين الأقطاب مادام لم يتم عبور فجوة الإلكترود. السلوك الكهربائي للإكليلات موضحا إلكترود شائع الاستخدام في المرسبات الكهروستاتيكية لسلك ذي نصف قطر a وأنبوب متمحور ذي نصف قطر داخلي b (الشكل 4). تدرج الفولطية بين الأنابيب عند نصف قطر r:

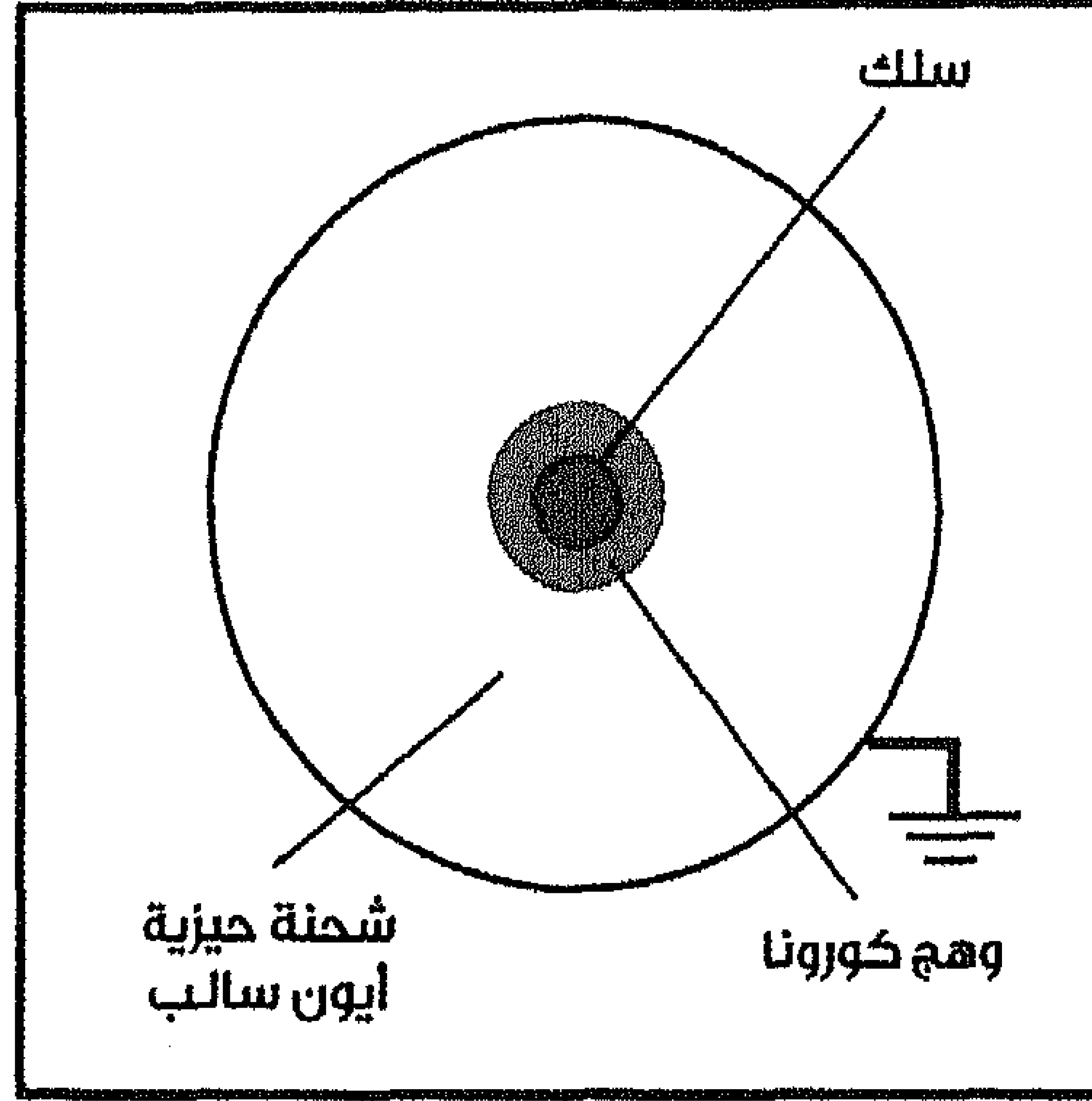
$$E = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

And since V =

$$\int_a^b E dr = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 \text{In}\frac{b}{a}} \quad \text{so } q = \frac{2\pi\varepsilon_0 V}{\text{In (b/a)}}$$

$$E = \frac{V}{r\,\text{In (b/a)}}$$

تبين هذه العلاقة أن أقصى شدة للمجال الكهربي يحدث عندما r = a عند سطح السلك. ويمكن تحديد شروط الإكليل بطريقة مشابهة للأسلاك والأقطاب النقطية والأقطاب المستوية.



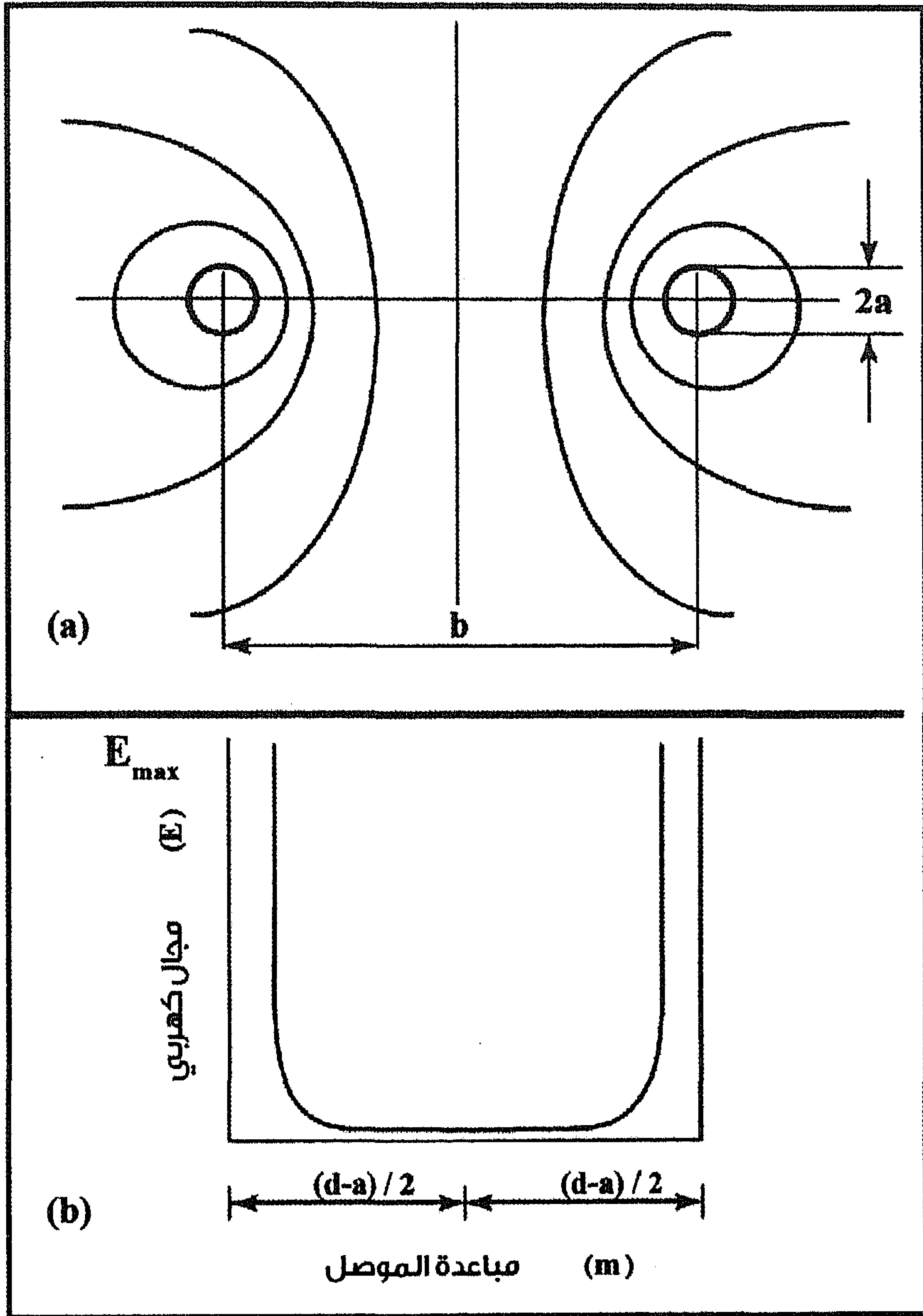
شكل (4): الإكليل بين السلك والأنبوبة المتحدة محوريا

الأيونات الموجبة والسالبة، والإلكترونات التي تنتج بالتصادم في المنطقة القريبة من الإلكترود، تتجاذب أو تتنافر اعتمادًا على قطبية إلكترود (سالبة أو موجبة). قد تصبح الإلكترونات ملحقة بالغازات الكهروسالبة مثل الأكسجين لتكوين أيونات سالبة. تشكل الجسيمات المشحونة غمدًا (غلافًا) من الأيونات الموجبة عند القطب الموجب، أو الإلكترونات والأيونات السالبة عند القطب السالب.

التفريغ الإكليلي على الموصلات:

الشكل الأكثر شيوعا لموصلات الفولطيات العالية (الضغط العالي) حيث يحدث الإكليل لموصلين متوازيين (شكل 5) مثل أسلاك أحمال الضغط العالي التي تستخدم لنقل الكهرباء. لأسطوانتين ذواتي نصف قطر a بينهما فاصل d كما هو موضح في شكل (5) بانتقال مستوى التوصيل عند مستوى التماثل عند نقطة التنصيف بين الأسطوانتين (بوضع Ed = E/2) نحصل على شدة المجال الكهربي على سطح الموصل من العلاقة:

$$Ed \approx \frac{V}{2a \,\text{In}\,(d/a)}$$



شكل (5): المجال الكهربي بين سلكين متوازيين: (a) تساوي الجهد بين الأقطاب، (b) المجال الكهربي على المحور بين الأقطاب

يحدد تيار التفريغ تجريبيا من العلاقة:

$$I = k_m (V - V_0)^2$$

حيث V جهد الشحن و V_0 جهد البداية و I تيار التفريغ و k_m ثابت

الإجهاد الكهربي الحرج يعطى بالعلاقة:

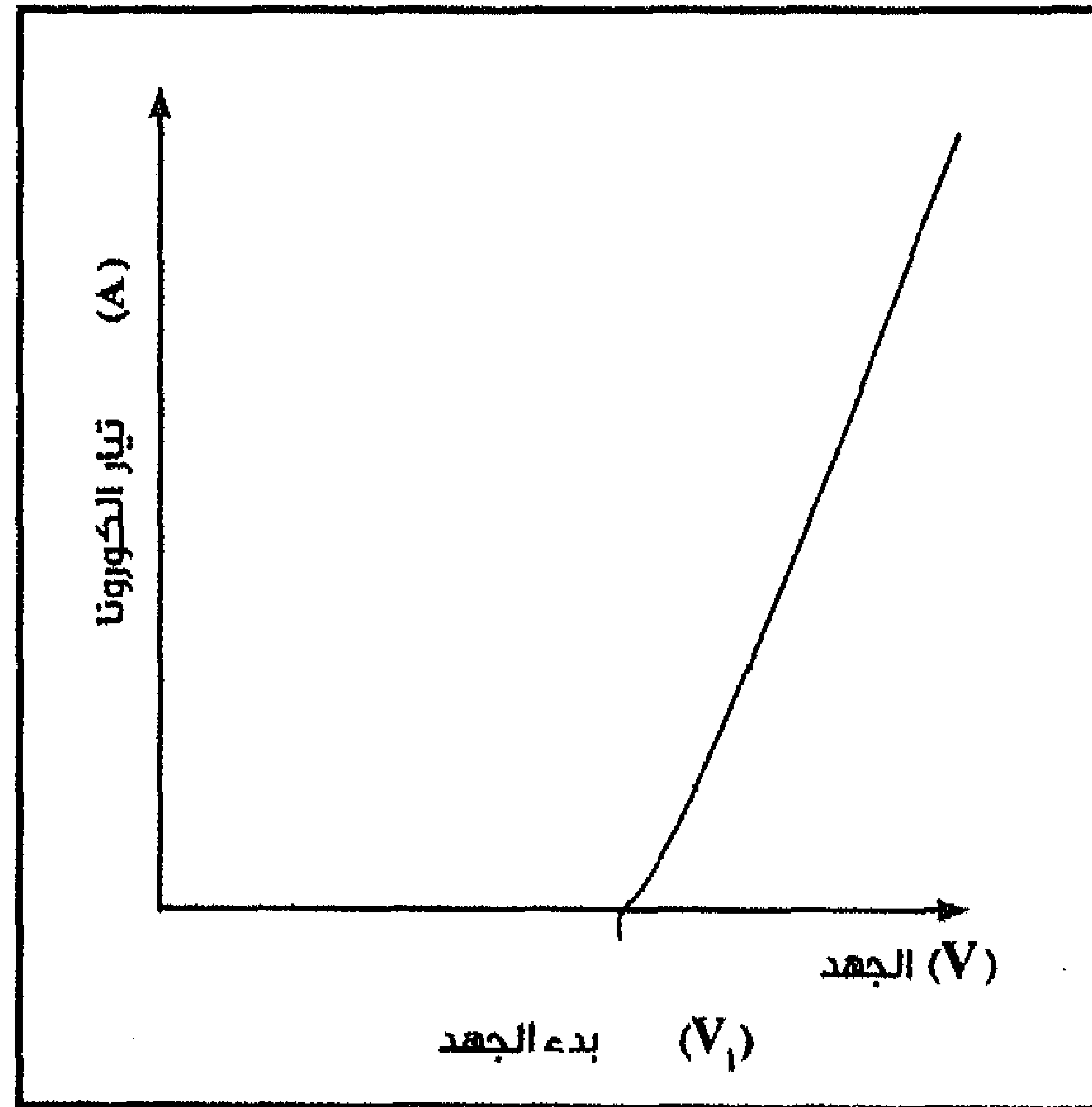
$$V_c' = m_0\, g_0\, \delta a \ln (d / a)$$

الذي يشمل المعاملات التجريبية للسطح غير المنتظمة m0 والضغط البارومتري δ0 وجهد المزج الحرج.

الفقد في القدرة يعطى بمعادلة: Peek s

$$Pc\ (\text{kW km-1 per phase}) = 244 \times \frac{f+25}{\delta} \times \sqrt{\frac{r}{d}} \times (V' - V_c')^2 \times 10^{-5}$$

الجهد عند مستهل الإكليل موضح بالشكل (6) يناظر البدء عند بداية المنطقة دون السوى (subnormal).



شكل (6): مستهل تيار الإكليل عند ابتداء الجهد بين موصلين متوازيين

العمق النصف قطري للغمد (الغلاف) يمكن أن يحدد تقريبا من نصف القطر الذي يسقط عنده المجال الكهربي إلى الحد الأدنى للانهيار الكهربي للهواء، ويحدد من المعادلة:

$$V_c' = m_0\, g_0\, \delta_a\, \mathrm{In}\,(d / a)$$

غمد الإكليل يفقد جزءًا من الطاقة الناشئة عن المقلادية والمستحثة بالإضاءة. التقلبات في تفريغ الإكليل تنتج من التذبذب عند التردد الطبيعي والتوافقيات لدائرة التغذية حتى نطاق الميكروويف مسببا تداخلًا كهربائيًّا. قطرات الماء تعمل كمكثفات مسببة ضجيجا صوتيا كلما سقطت القطرات.

عمليات الشحن الكهروستاتيكية:

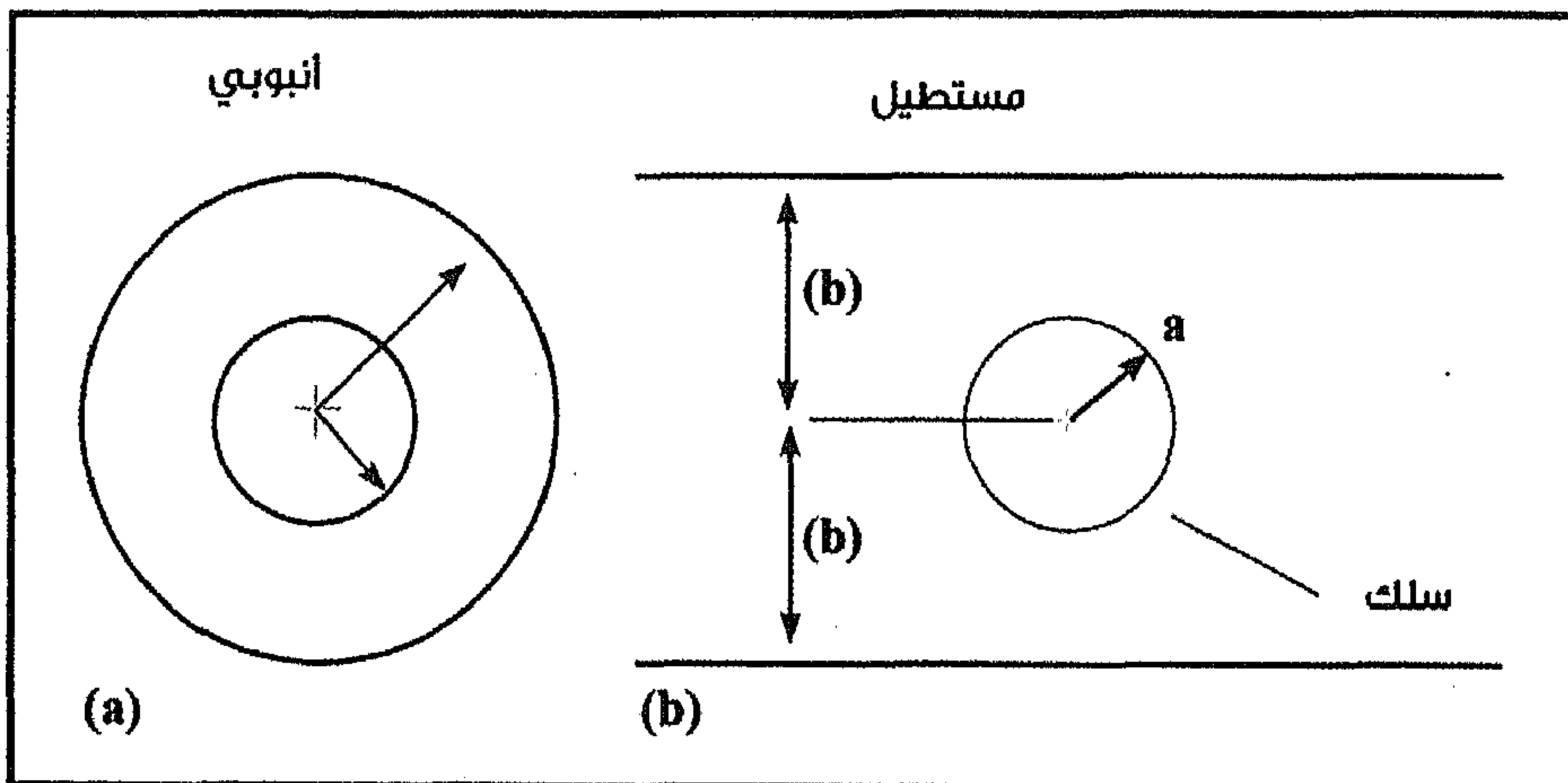
المواد العازلة، بما في ذلك السوائل، يمكن شحنها وتفريغها بتمريرها من خلال غاز مؤين، معتمدة على توزيع شحنتها. تنظيف الهواء وجمع الجسيمات، والطلاء والطباعة هي بعض المجالات التي تستخدم فيها عمليات الشحن الكهروستاتيكي. عمليات الشحن الكهروستاتيكي تستخدم مجالًا كهربائيًّا لإنشاء شحنة حيزية من الإلكترونات الحرة والأيونات. الشحنة الحيزية قد تستخدم لشحن الجسيمات أو السطح بارتباط الإلكترونات أو الأيونات، التي تنجذب إلى السطح المشحون الموجهة إليه كما هو الحال في الطباعة أو تهاجر إلى سطح الأقطاب كما في المرسبات الكهروستاتيكية. التفريغ الإكليلي يمكن استخدامه كمصدر للأيونات ويمكن شحن الجسيمات بارتباط الأيونات. في حالة إيجابية القطب الفعال (حيث تركيز المجال الكهربائي يكون أعلى)، فإنه يجذب الشحنة السالبة ويصد الأيونات الموجبة ويعمل كمصدر للأيونات الموجبة.

انتشار الشحن يعود إلى الحركة الحرارية السريعة للأيونات في الشحنة الحيزية مما يؤدي إلى ارتباط الأيونات بالجسيمات. عندما يكون القطب الفعال سالب القطبية يجذب الأيونات الموجبة، ويصد الأيونات السالبة والإلكترونات، ويعمل كمصدر من الإلكترونات والأيونات السالبة. يحدث الشحن حتى تصبح الجسيمات مشبعة ويحدث

تنافر للأيونات الأخرى ومقدار الشحنة متناسب مع مساحة السطح. يحدث التأين للجسيمات المشحونة في منطقتي القطب.

المرسبات الكهروستاتيكية:

المرسبات تستخدم في ترسيب الأتربة من عمليات توليد الطاقة الكهربية وتصنيع الأسمنت. عمليات شحن الجسيمات تستخدم في المرسبات التي تعمل عبر مناطق تاونسند والتوهج دون السوى/ الإكليل المحدود بالانهيار الكهربي للهواء عند الضغط الجوي عند حوالي 3kV / mm يناظر تيارا في حدود المللي أمبير حيث يلاحظ التفريغ التوهج- الإكليلي. شكل القطب الشائع (شكل 7) هو قطب من سلك مركزي محوري ذي نصف قطر r_0 وأنبوب داخلي ذي نصف قطر R.

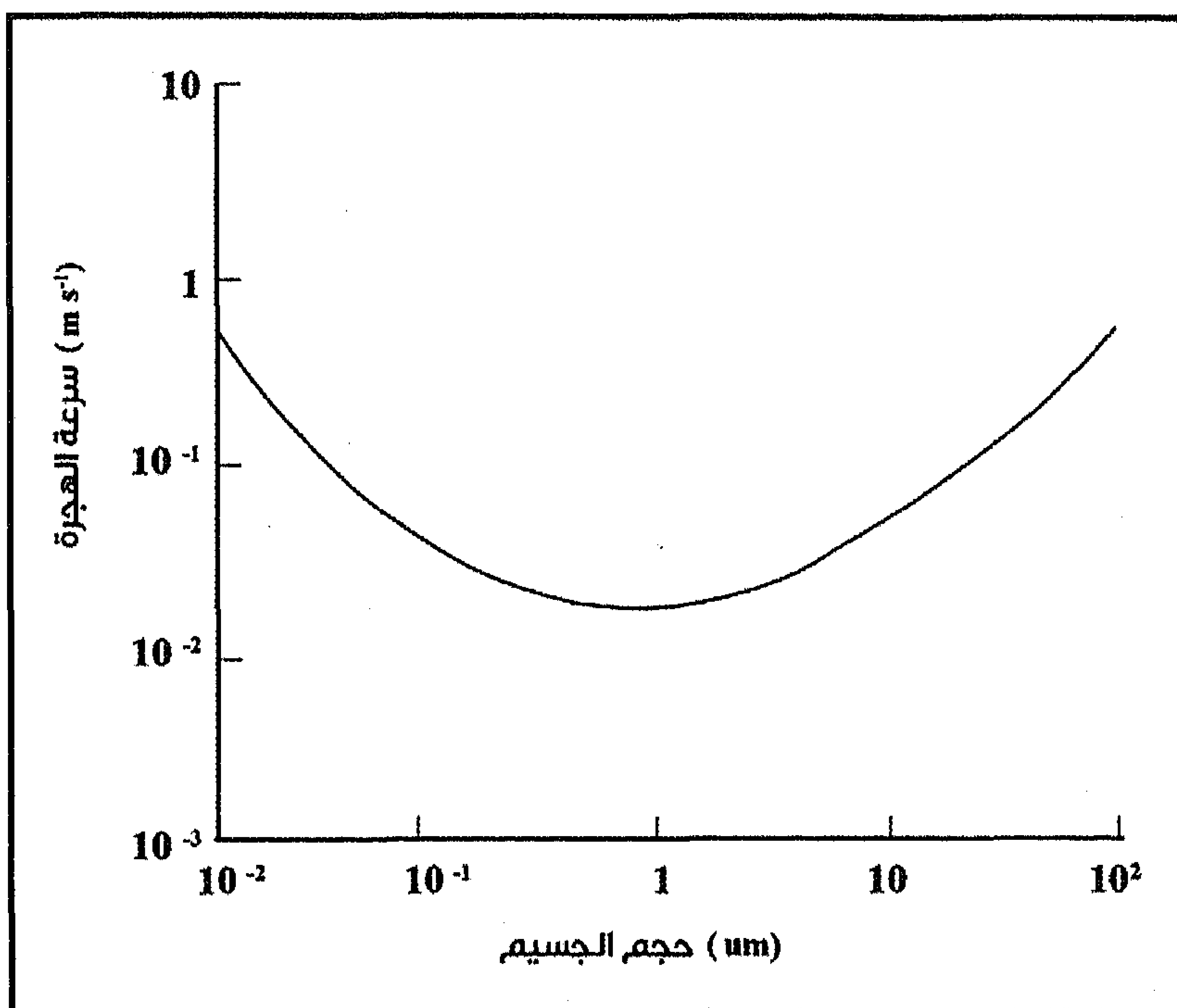


شكل (7): خلايا المرسبات الكهروستاتيكية (a) أنبوبية (b) مستطيل

يحدث الشحن قريبا من القطب المركزي حيث المجال الكهربائي هو أعلى وترحيل الجسيمات نحو الأقطاب. ويتغير التفريغ مع قطبية القطب والتيار، وسواء التيار مستمر أو نبضي. شحن الجسيمات يحدث في المنطقة الواقعة بين حدود منطقة المجال العالي القريب إلى القطب الداخلي و القطب (غير الفعال) الخارجي. بدء الإكليل يكون أكبر مع القطبية السالبة المتصلة بالقطب المركزي. للجسيمات ذات القطر الأكبر من 1 ميكرومتر، يحدث

الشحن بارتباط الأيون، مجال الشحن أو ارتطام الأيون. إذا تم سالبية القطب، يجذب القطب الأيونات الموجبة ويصد الإلكترونات ويعمل كمصدر للإلكترونات. المجال الكهربائي العالي القريب من القطب الفعال (عادة سالب القطبية) يؤدي إلى تأين الغاز لإنتاج الأيونات الموجبة والسالبة والإلكترونات. الجسيمات الأكبر (الأكبر من 1 ميكرومتر) تشحن بارتباط الأيون بالتصادم مع الجسيمات المشحونة من الإكليل في فراغ القطب الداخلي.

الجسيمات ذات قطر أقل من 0.2 ميكرومتر تشحن بالانتشار من الحركة الحرارية للأيونات وقد تحدث بشكل مستقل عن المجال الكهربائي. الجسيمات الأكبر تملك شحنة تشبع أعلى نظرًا لحجمها ولكن بأدنى سرعات هجرة، وتشبع الشحنة أصغر بكثير بالقياس إلى الجسيمات الأكبر (شكل 8)؛ ومع ذلك، تزيد سرعة الهجرة بإنقاص القطر.



شكل (8): تغير سرعة الهجرة مع حجم الجسيم

الجسيمات المغبرة بحاجة إلى وقت كاف بعد شحنها للعبور إلى الأقطاب، ومن ثم طول المرسب المطلوب يكون دالة في معدل تدفق الغاز. زمن شحن الجسيمات يكون سريعا جدًّا، ليصل إلى حوالي 90٪ من شحنة التشبع في أقل من 0.1 ثانية، وتكون متبوعة بمرحلة فصل الجسيمات، التي تستغرق عدة ثوان في قيم المجال الكهربي الأقل. سيتم إزالة الجزيئات، شريطة أن زمن الهجرة بين الأقطاب أقل من زمن الإقامة τ_r.

يمكن حساب سرعة الهجرة بتحديد توازن القوى على الجسيم. إذا كانت الشحنة لكل جسيم هي q ونصف قطر الجسيم r والقوة نصف قطرية على الجسيم qE_r حيث E تدرج الفولطية والسرعة نصف قطرية تعطى بالمعادلة:

$$u_r = \frac{neE_r}{6\pi\rho\eta}$$

حيث ρ نصف قطر الجسيم و η اللزوجة

للجسيمات الأقل من 10µm (القطر) التصحيح لقانون ستوك يحتاج للتطبيق وسرعة الهجرة تصبح:

$$u_r = \frac{2E^2 r\, C_0}{\eta}$$

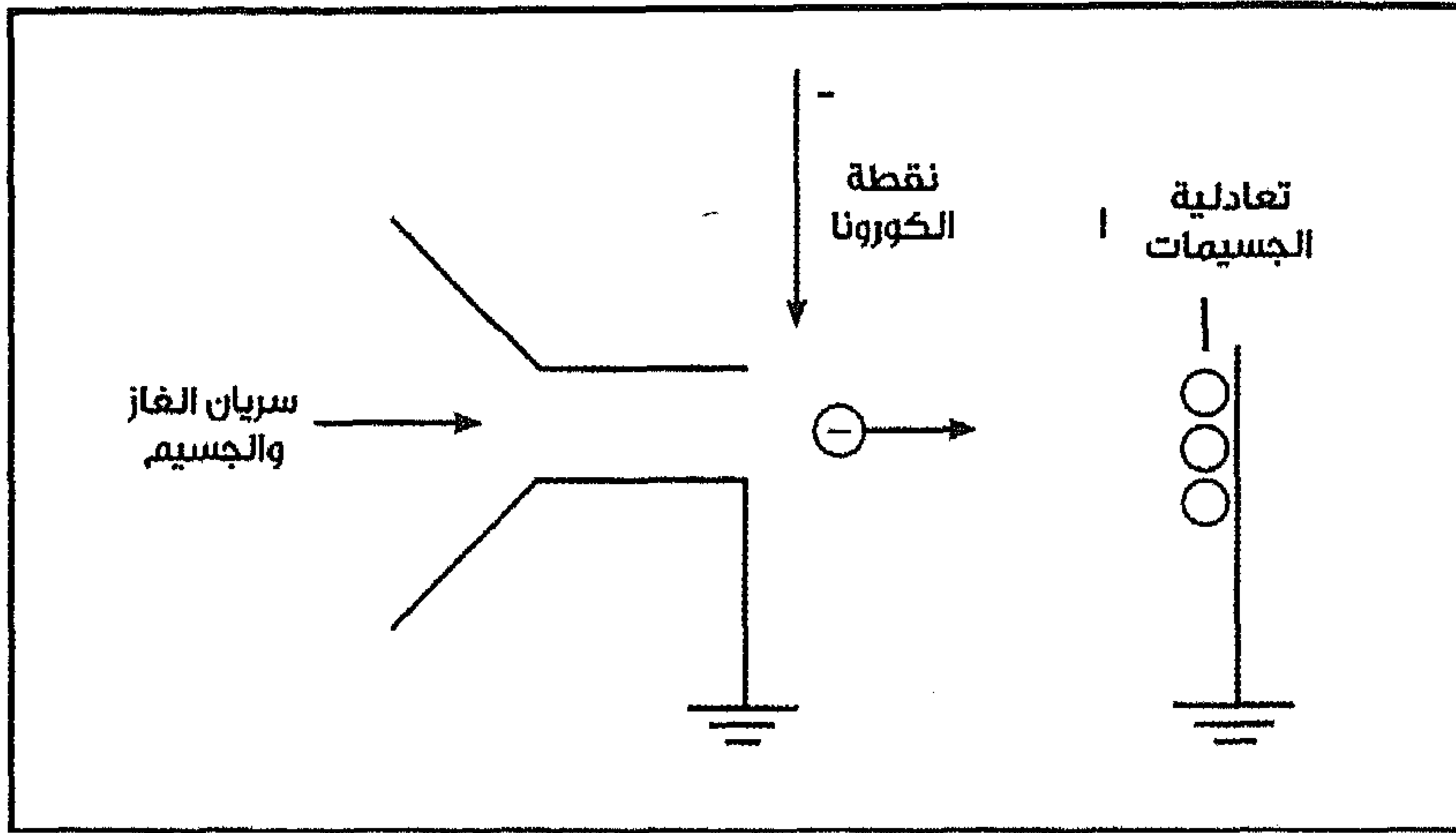
حيث C_0 عامل التصحيح الذي يزداد سريعا كلما أصبح القطر أقل من 1µm.

النتائج النظرية المشتقة تبين أن سرعة الهجرة تقل نحو 0.5µm لقطر الجسيم الأقل من ذلك. تبدأ سرعة الهجرة في الزيادة السريعة نظرا لتأثير زيادة انتشار الشحنة عند الأقطار الصغيرة للجسيمات. الجسيمات العازلة تصبح مشحونة وتلتصق بالأسطح ذات القطبية العكسية، أما الجسيمات الموصلة فلا.

الترسيب الكهروستاتيكي:

يمكن استخدام الرش الكهروستاتكي لطلاء المواد المشحونة في شكل مسحوق أو سائل أو الألياف في نطاق 10– 120 ميكرومتر. لرش جزيئات المواد يستخدم نفاث الهواء ذو السرعة المنخفضة ويقيد في منطقة المجال العالي بالتصادم بين الأيونات والإلكترونات الصادرة عن تفريغ الإكليل في الفراغ بين القطب النقطي والفوهة (الشكل 9). الأقطاب تكون عند فولطية عالية 30 – 120 كيلو فولت. توجد سلسلة معوقات تحد من التيار، وتدرج الفولطية العالية توجد على طول النفاث، الذي عادة ما يعمل على مسافة حوالي 25 مم من السطح. تنجذب الجسيمات إلى قطعة العمل التي هي موجبة. تفقد الجسيمات شحنتها الكهروستاتيكية على الأثر.

يمكن الحصول على سمك فيلم من 10 إلى 200 ميكرومتر، على الأسطح الباردة التي هي لاحقًا تصهر حراريًا. كذلك يمكن الحصول على أفلام أكثر سمكا بالرش على سطح ساخن حيث تنصهر الجزيئات وتذوب. المجال الكهربائي المحلي ينخفض كلما استفحل الطلاء، ليسفر عن سمك طلاء منتظم. التقنيات المماثلة لتلك تستخدم لإيداع الطلاء مثل التي تستخدم لرش السوائل (مبيدات الآفات) لتوفير طلاء أكثر تماثلًا مع الرش الدقيق بتقليل الفاقد وتغطية أفضل من الأساليب التقليدية. التفريغ الإكليلي يستخدم في عمليات التصوير والطباعة.



شكل (9): عملية الترسيب الكهروستاتيكية

يتم الحصول على الصورة بإزالة الجسيمات الغير مشحونة ميكانيكيا ودمج الجسيمات المشحونة المتبقية إلى الورقة. يمكن إزالة هذه الشحنة المتبقية على الورقة بمصدر كورونا ثانية.

شاشات البلازما(Plasma display) :

مبدأ عمل شاشات البلازما (Plasma display) يعود إلى العام 1964 في **جامعة إلينوي الأمريكية**، ولم تكن الفكرة أكبر من شاشة مكونة من نقطة ضوء. تم منذ ذلك الوقت وحتى نهاية الستينيات العمل على تطوير شاشة متكاملة من تلك النقطة. هذه الشاشة كانت صغيرة وتعطي صورًا غير واضحة، وكانت فكرة الحصول على شاشة مسطحة وكبيرة وجودة عالية في ذلك الوقت كمشهد من الخيال العلمي، ولكن مع تطور العالم الرقمي تم الوصول إلى شاشات عالية الجودة وتغطي مساحة كبيرة. حديثا سمعنا عن شاشات تلفزيونية من نوع آخر تسمى شاشات البلازما plasma flat panel display هذه الشاشات يمكن أن تصل إلى 60 أنش (بوصة) أو أكثر وسمكها لا يزيد عن 15 أو 17 سنتيمترًا، ويمكن تعليقها على الجدار كالصورة، هذا بالإضافة إلى العديد من المزايا والخصائص التي تعطي رفاهية ومتعة مشاهدة أكثر من التلفزيونات التقليدية.

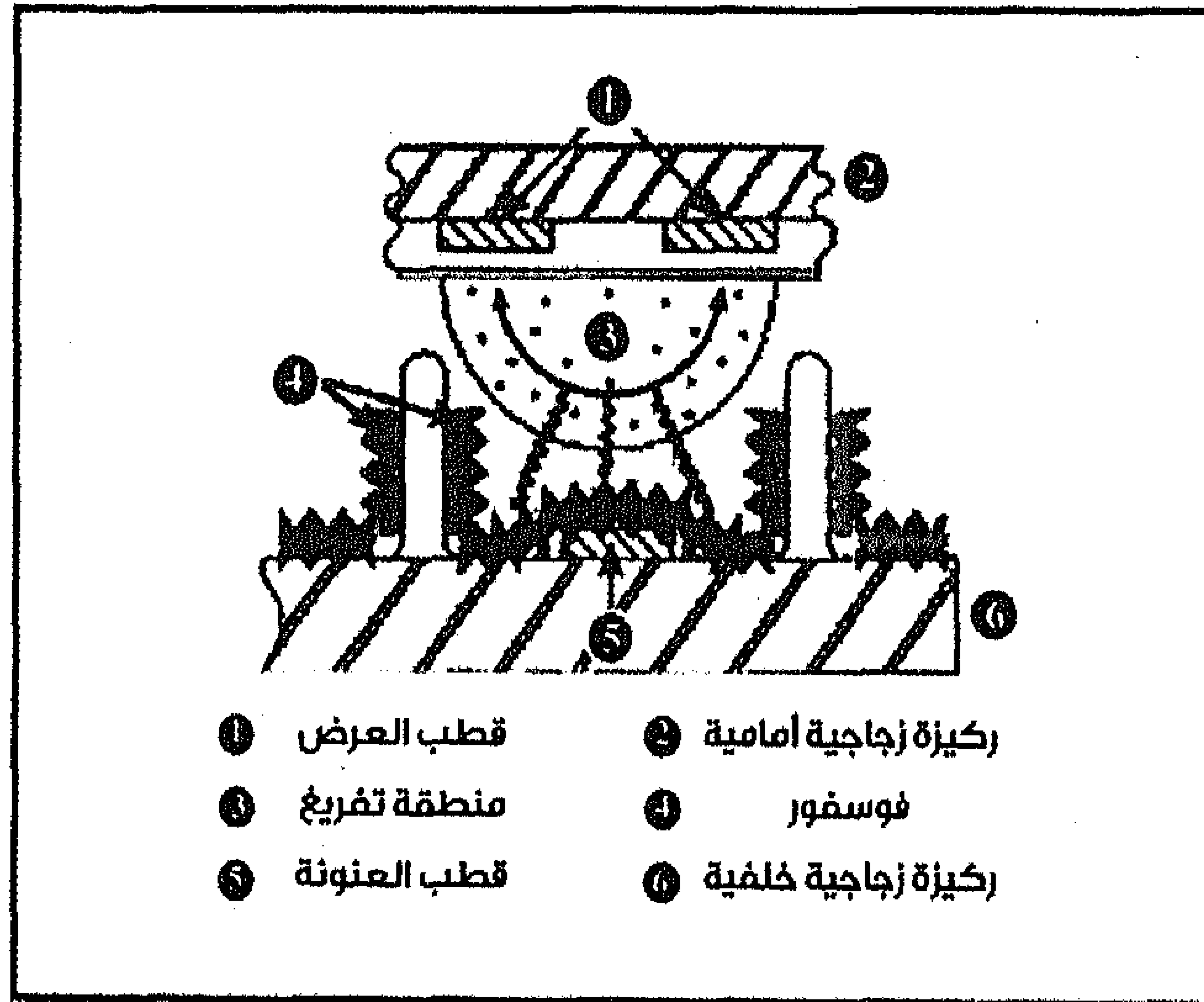
وللتعرف أكثر على فكرة عمل هذه الشاشات التي بدأت تنتشر بكثرة يجب أولا أن نلقي بعض الضوء على فكرة عمل الشاشات التقليدية. فمنذ أكثر من 70 عامًا اعتمدت أجهزة التلفزيون على **شاشات الكاثود** Cathode ray tube حيث تتكون شاشات الكاثود من مدفع إلكتروني في أنبوبة مفرغة وتنطلق الإلكترونات المعجلة باتجاه شاشة فسفورية، وباستخدام مجالين كهربيين متعامدين يمكن مسح الشعاع الإلكتروني على الشاشة بمعدل يصل إلى 25 مرة في الثانية، تعمل الإلكترونات عند سقوطها على ذرات الفسفور المكونة للشاشة على إثارتها مما تجعلها تعطي ضوءًا لتتخلص من إثارتها. هذا الضوء المنبعث من تلك العناصر الضوئية (ذرات الفسفور) يُكَوِّن الصورة التي نشاهدها. هذه الصورة التي نحصل عليها من شاشات المهبط صورة واضحة ومقبولة ولكن حجم الشاشة كبير، مما يعني عمقًا كبيرًا لجهاز التلفزيون ويصبح الجهاز ثقيلا ويشغل حيزًا كبيرًا من الغرفة الموجود بها.

نعلم أن شاشات المهبط في التلفزيون الملون تعمل من خلال تقسيم الشاشة إلى مربعات صغيرة تسمى البكسل pixel وهو عنصر الصورة، ويكون هناك ثلاثة بكسلات لكل من الألوان الأساسية وهي الأحمر والأخضر والأزرق، وتكون موزعة على مساحة الشاشة، وعند اصطدام الإلكترونات بأي من هذه البكسلات يعطي ضوءًا بلون البكسل وهكذا تتكون الصورة. تعمل شاشات البلازما بنفس الآلية حيث يتكون كل بكسل من ثلاثة ألوان (الأحمر والأصفر والأزرق). لا يوجد الشعاع الإلكتروني ولا الشاشة الفسفورية، إنما يتم توليد هذه الألوان الثلاثة في كل بكسل من خلال fluorescent lights ضوء فلوريسنت. ومن خلال التحكم ودرجة شدة كل ضوء فلوريسنت ينتج اللون المطلوب، وهذا يحدث على كل بكسلات الشاشة وعندها تتكون الصورة الكاملة.

يتم توليد ضوء الفلوريسنت من خلال البلازما المكونة من أيونات موجبة الشحنة وإلكترونات سالبة الشحنة. وبالطبع هذا الغاز (البلازما) يحدث في ظروف خاصة مثل

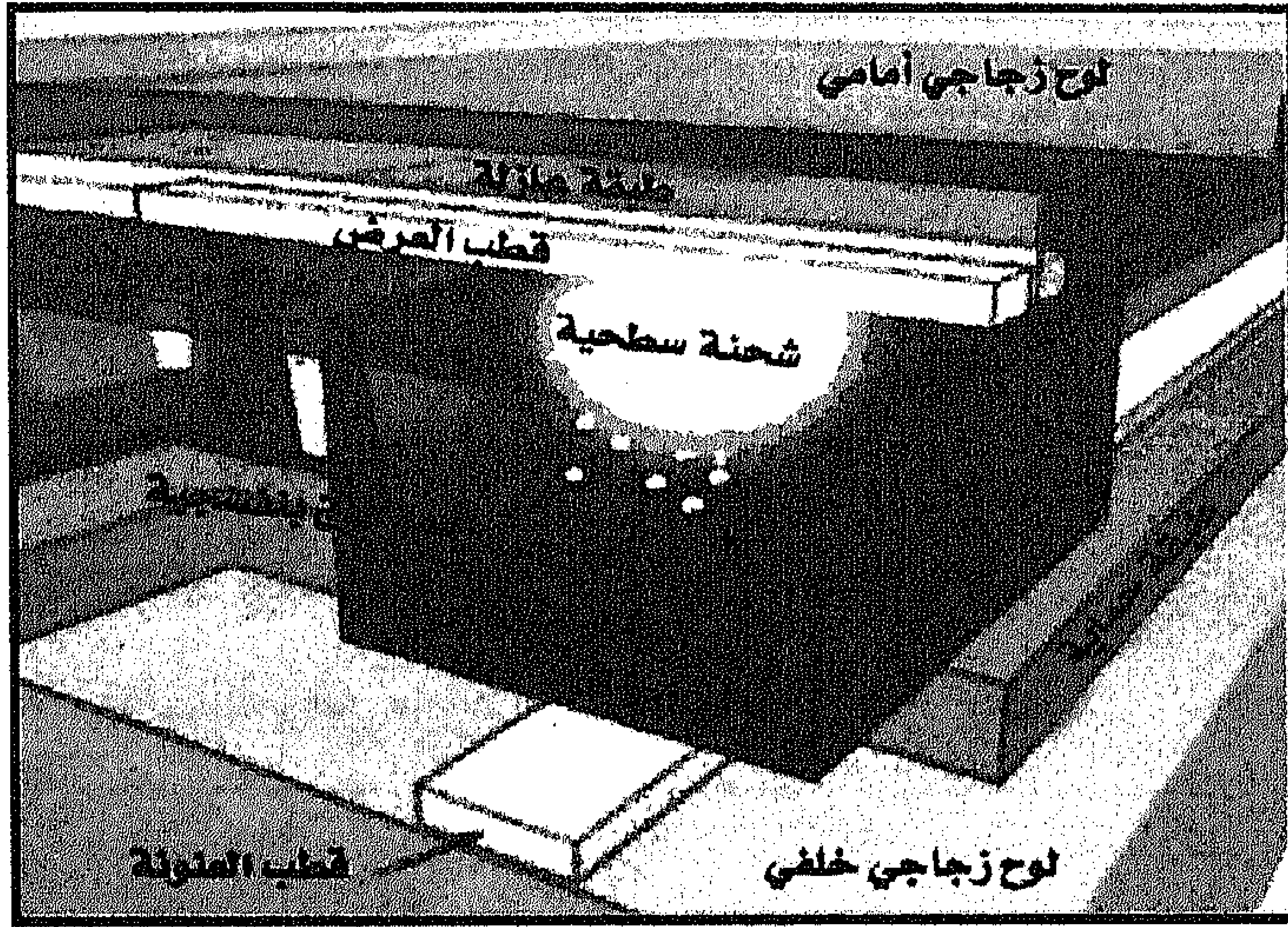
أن يكون الغاز داخل مجال كهربي كبير ناتج عن فرق جهد عالٍ؛ مما يؤدي إلى انجذاب الإلكترونات إلى الطرف الموجب والأيونات إلى الطرف السالب فتصطدم الإلكترونات مع الأيونات، مما يؤدي إلى إثارة ذرات الغاز وينتج عن هذه الإثارة تحرر طاقة في صورة فوتونات ضوئية.

يتم في شاشات البلازما استخدام غاز مكون من ذرات **النيون** وذرات **الزينون**، وعند إثارة هذا الغاز نحصل على **فوتونات** في مدى الترددات الفوق بنفسجية التي تستخدم للإثارة للحصول على فوتونات بترددات في المدى المرئي، تتوزع ذرات النيون وذرات الزينون على آلاف الخلايا المحصورة بين لوحين من الزجاج. المنطقة رقم (2) و(6) الموضحة في الشكل (8). يتصل باللوح الزجاجي الأمامي (2) قطب يسمى قطب العرض Display Electrode ويتصل باللوح الزجاجي الخلفي (6) قطب العنونة Address Electrode وبالتالي تصبح كل خلية ضوئية (تحتوي على ذرات النيون والزينون) محاطة بقطب العرض من الأمام و قطب العنونة من الخلف.



الشكل (8): توزيع ذرات النيون وذرات الزينون على آلاف الخلايا

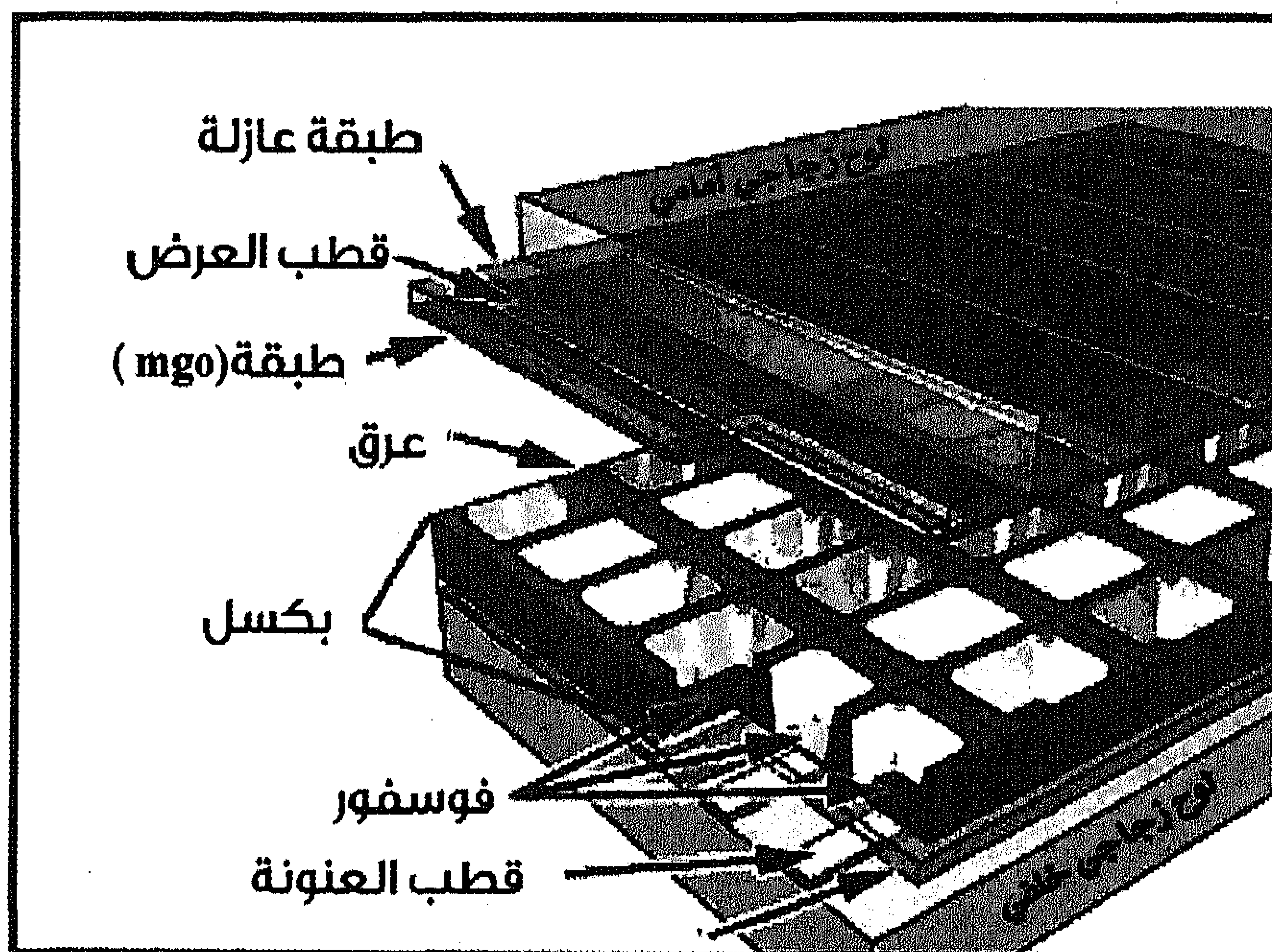
تحيط مادة عازلة غير موصلة للكهرباء dielectric material قطب العرض ومغطاة بطبقة واقية من أكسيد الماغنيسيوم لتكون بين الخلية الضوئية ولوح الزجاج الأمامي. كما هو موضح في الشكل (9)، اللون الأصفر للقطب الأمامي والخلفي والخلايا الضوئية موضحة باللون الأزرق ويوجد بجانبها خلية ضوئية خضراء وأخرى حمراء، كذلك موضح الطبقة الواقية الشفافة من MgO.



الشكل (9): رسم توضيحي للأقطاب والخلايا الضوئية

بنظرة شمولية أكثر نلاحظ في الشكل (10) كيف تترتب الخلايا الضوئية على مساحة الشاشة، وتقسم الشاشة إلى وحدات صغيرة تسمى عناصر الصورة وتدعى بكسل، كل بكسل عبارة عن ثلاث خلايا ضوئية للألوان الأحمر والأخضر والأزرق. ونلاحظ أيضا أشرطة القطب (اللون الأصفر) بحيث تكون مرتبة في صفوف متوازية ويكون قطب العنونة ممددًا على طول الخلايا الضوئية ذات اللون الواحد، ويكون قطب العرض ممددا على طول البكسل. وهذا يكون على طول وعرض الشاشة مما يشكل في النهاية شبكة من القطب.

وعملية تأين الغاز في داخل أية خلية ضوئية يتحكم فيه كمبيوتر خاص للشاشة حيث يتحكم في توجيه الشحنة الكهربية إلى القطبين المتعامدين فيحدث التفريغ الكهربي في تلك الخلية، وتتكرر هذه العملية آلاف المرات في جزء من الثانية. عندما يُشحن القطبان المتعامدان (المتقاطعان) يصبح هناك فرق جهد بينهما فيمر تيار كهربي في تلك الخلية الضوئية التي تحتوي على غاز النيون والزينون فيتأين الغاز ويتحول إلى بلازما وتنطلق أشعة كهرومغناطيسية (فوتونات) فوق بنفسجية. تعمل الأشعة فوق البنفسجية المنطلقة من البلازما على إثارة المادة الفسفورية المغلفة للخلية الضوئية، حيث تمتص إلكترونات ذرات الفسفور فوتون الأشعة فوق البنفسجية وينتقل الإلكترون إلى مستويات طاقة أعلى، وعند عودة الإلكترون المثار إلى مستوى طاقته الأصلي يعطي ضوءًا في المدى المرئي.



الشكل (10): ترتيب الخلايا الضوئية على مساحة الشاشة

كما ذكرنا سابقا فإن كل بكسل مكون من ثلاث خلايا ضوئية وكل خلية ضوئية مغلفة من الداخل بمادة فسفورية تعطي ضوءًا أحمر والثانية تعطي ضوءًا أخضر والثالثة تعطي الضوء الأزرق (أي أن هناك ثلاثة أنواع مختلفة من الفسفور لكل خلية ليعطي الألوان الأساسية). وبالتحكم بشدة تيار النبضات الكهربية الموجهة بواسطة الكمبيوتر إلى الخلايا الضوئية المختلفة يمكن الحصول على خليط من الألوان الأساسية لتعطي في المحصلة كل الألوان الممكنة. وحيث إن التحكم يصل إلى كل بكسل فإن الصورة الناتجة من الشاشة ذات دقة عالية مهما كانت الزاوية التي ننظر منها إلى الشاشة.

مميزات شاشات البلازما:

وزن الشاشة خفيف ومسطحة تمامًا وسمكها لا يزيد عن 15 سنتيمترًا مما يجعل تعليقها على الجدران ممكنًا. مدى رؤية كبير يصل إلى 160 درجة، وصورة واضحة وألوان زاهية ودقة عالية. لا تتأثر بالمجالات المغناطيسية حولها وبالتالي يمكن تثبيت نظام سمعي عالي الجودة دون القلق على التأثير المغناطيسي للسماعات على الشاشة.

الفصل السابع

تطبيقات البلازما الباردة عديمة التوازن

مقدمة:

يمكن إيجاد توازن الشحنات عند ضغوط الغازات المنخفضة ولكن فصل جزيئات الغاز المحايد غير كافية لكي تحدث تصادمات للتوازن الحراري في البلازما. من الصعب اقتران الطاقة في البلازما نظرًا إلى انخفاض عدد التصادمات في الضغوط المنخفضة التي تتطلب أوقات الإقامة الطويلة. عند الضغوط المنخفضة جدًّا - على سبيل المثال في أشعة الإلكترونات والأيونات - توازن الشحنة لم تعد موجودة، ولأن فترة الإقامة قصيرة، فمن الضروري الاحتياج إلى الفولطيات العالية أو التيارات. وترد بعض الخصائص المميزة للتفريغ الوهاجي ذي الضغط المنخفض في الجدول (1).

الجدول (1): بعض الخصائص المميزة للتفريغ الوهاجي ذي الضغط المنخفض

Mean free path at 1 Torr	$\sim 50 \times 10^{-6}$ m
Debye length	$\sim 10^{-4}$ m
Electron densities	$10^{15} - 10^{18}$ m^{-3}
Degree of ionization	$10^{-6} - 10^{-4}$
Electron energies	1 – 8eV
Ion energies	> 10eV
Gas pressure	0.1 – 1 Torr
Frequency	DC 13.56 MHz

اقتران الطاقة الكافية في البلازما هو إحدى الصعوبات التي تكتنف استخدام البلازما في الضغوط المنخفضة. الأساليب المستخدمة وتشمل البلازما المقترنة بالحث (ICPs)، ومصادر البلازما الحلزونية والهليكونية والسعوية وتعزيز كثافة الطاقة عبر استخدام المجالات الكهربائية والمغناطيسية، استخدام المغنيطرون (صمام مفرغ يستخدم لتوليد موجات ميكروويف عالية القدرة)، مسرع الإلكترون الحلقي الرنان (ECR) والاقتران الحلزوني (هيليكونات).

عمليات البلازما المستخدمة في تصنيع الإلكترونيات:

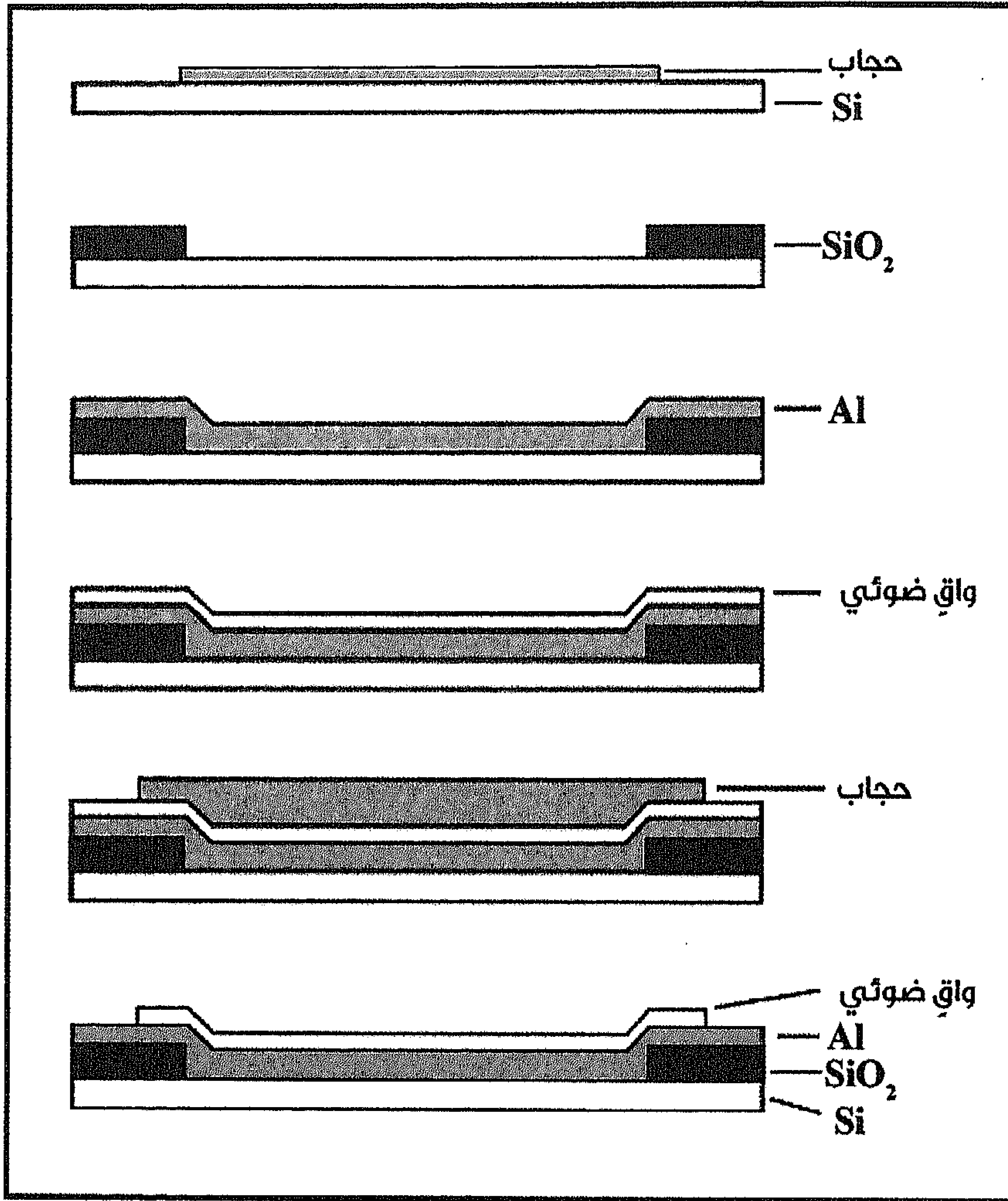
عمليات بلازما التفريغ الوهاجي تستخدم على نطاق واسع في تصنيع أشباه الموصلات، وعلى وجه التحديد رقاقات ذاكرة الكمبيوتر. بعض من هذه العمليات والطاقات المطلوبة ترد في الشكل (1).

غرس أيون		ترسيب شعاع أيون		ترسيب بالرش		تبخر حراري
10^4	10^3	10^2	10	1	10^{-1}	10^{-2}

(eV) إلكترون فولت

شكل (1): طاقة الأيون المطلوبة في عمليات مختلفة.

اليوم وفي الدوائر المتكاملة السيلكونية، قد يصل عدد الترانزستورات على رقاقة كمبيوتر مفردة إلى 10^9. عرض الأخدود المنمش (الفصل بين المكونات على الرقاقة) أقل من 0.2 ميكرومتر. التصنيع ينطوي على سلسلة من الخطوات المختلفة تصل إلى 12 خطوة تستخدمها عمليات البلازما في التفريغ الغازي ذي الضغط المنخفض. وترد بعض الأمثلة عن ذلك في الشكل (2).



شكل (2): استخدام البلازما في المراحل المختلفة لتصنيع أشباه الموصلات

العمليات المختلفة تكون كالتالي:

1) فيلم الترسيب (بما في ذلك السبيكة والمركبات العضوية).

2) تعزيز البلازما بترسيب الأبخرة الكيميائية (PECVD) عند انخفاض درجات حرارة الركازة.

3) غرس الأيون.

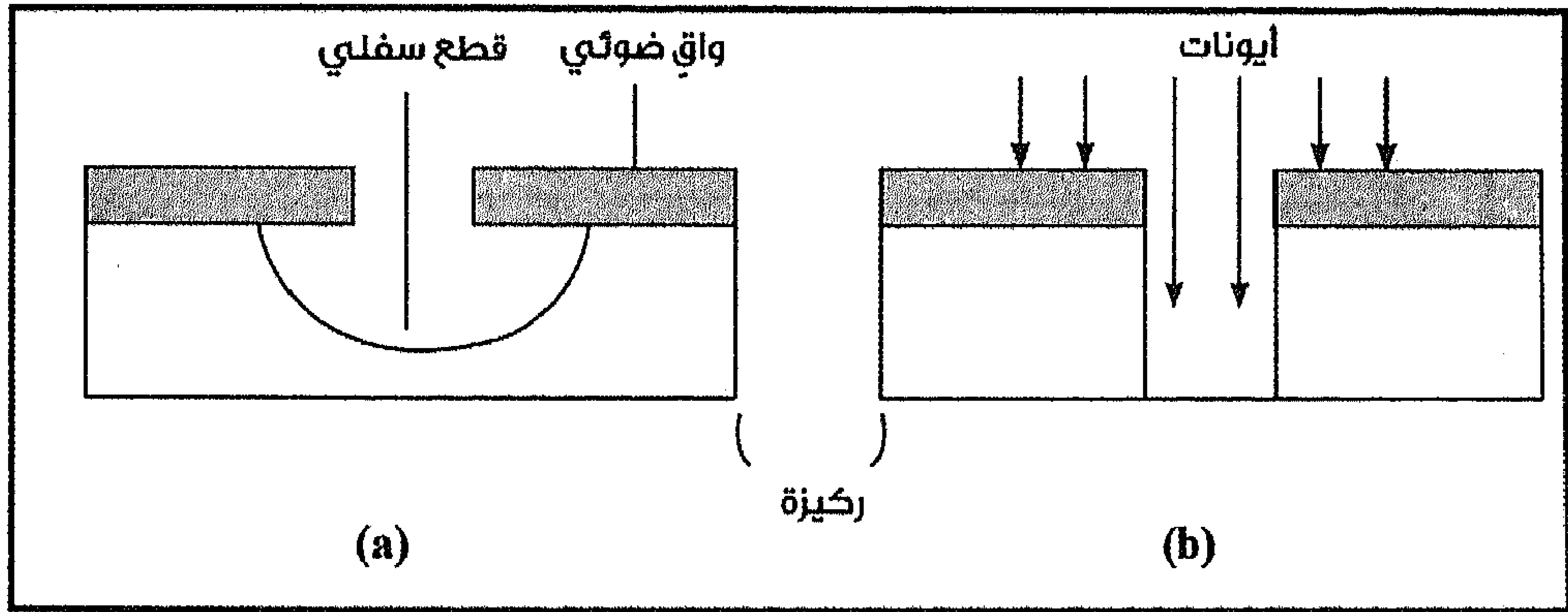
4) ترسب الأقنعة.

5) إزالة من الأقنعة (الترميد).

6) أنماط حفر عالية الجودة.

7) رشرشة فعالة وغير فعالة.

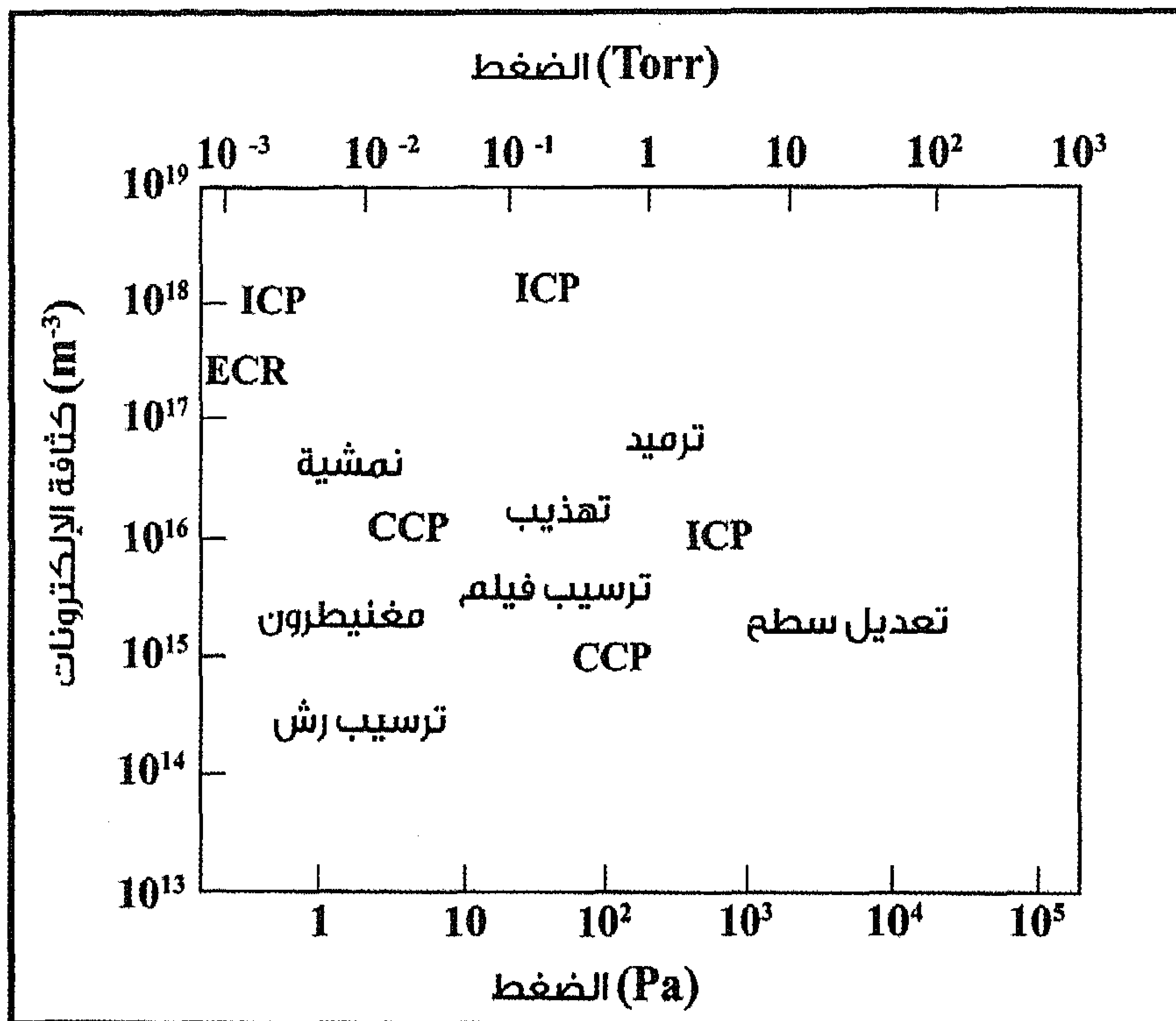
العديد من العمليات تتطلب طبقة منمشة أو مترسبة عالية الجودة. القدرة على النمش غير متماثل الخواص مع ارتفاع النسبة الباعية (الارتفاع إلى العرض) وجودة عالية بدون اختزالية تحدث مع العمليات الكيميائية (الشكل 3) وهي أحد التطبيقات الأكثر تطلبا في تصنيع أشباه الموصلات.



شكل (3): النمش بواسطة (a) العملية الكيميائية (b) البلازما

بعض العمليات المختلفة وضغوط الغازات المستخدمة ترد في الشكل (4). ضغط الغاز عادة في نطاق 10^3 Pa – 10 الذي عنده متوسط المسار الحر بين 5×10^{-3} و 5×10^{-5} متر اعتمادًا على الغاز. إعادة اتحاد الجسيمات المشحونة لدى الجدار ذات أهمية في الضغط المنخفض، بينما في الضغط العالي التصادمات بين الجسيمات تكون مهيمنة.

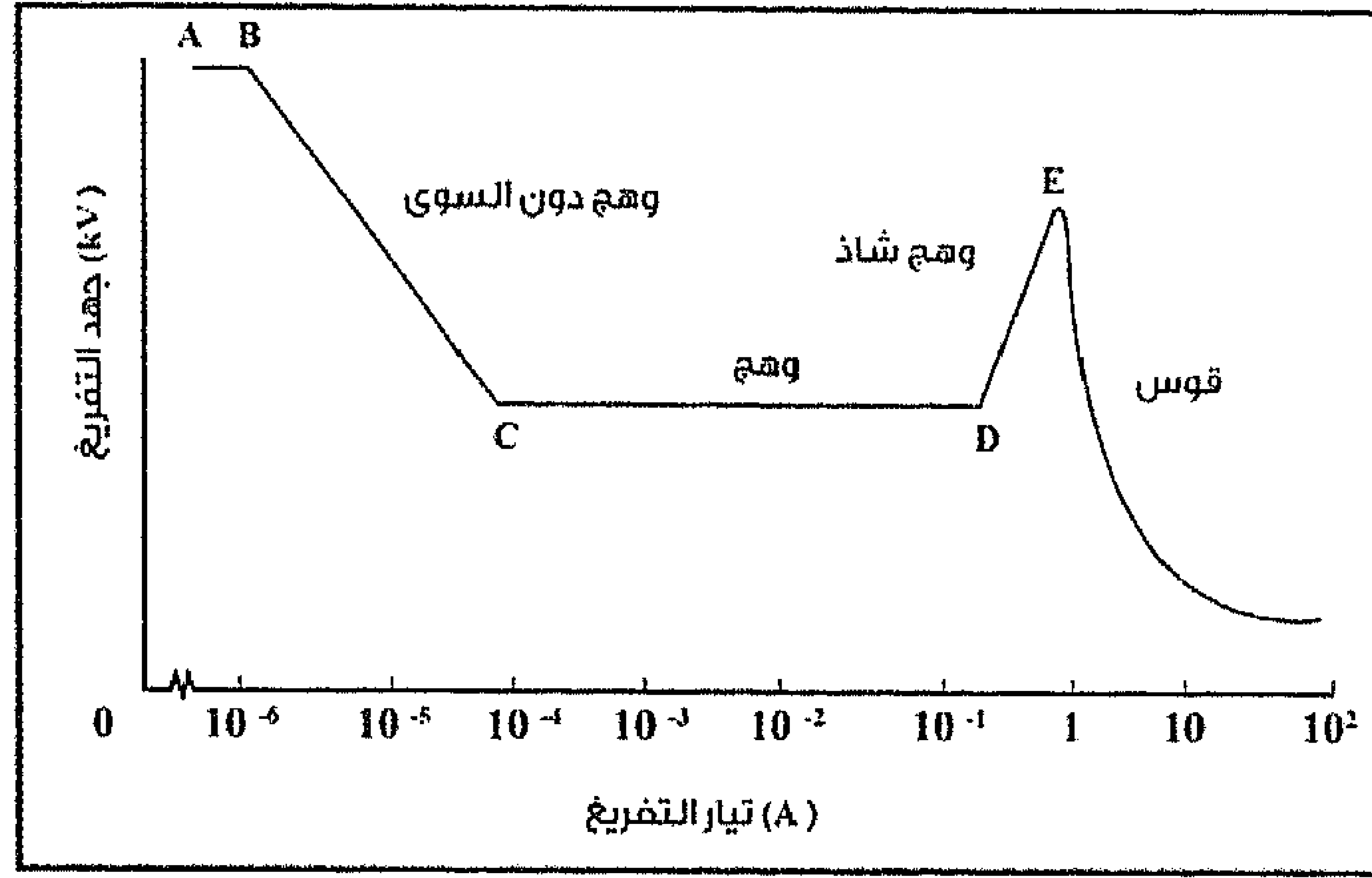
والعملية عند تلك الضغوط المنخفضة تقدم التحدي المتمثل في كيفية نقل الطاقة من الإلكترونات بتصادم الذرات والأيونات المطلوبة في العمليات المختلفة.



شكل (4): استخدام البلازما ذات الضغط المنخفض في تصنيع أشباه الموصلات

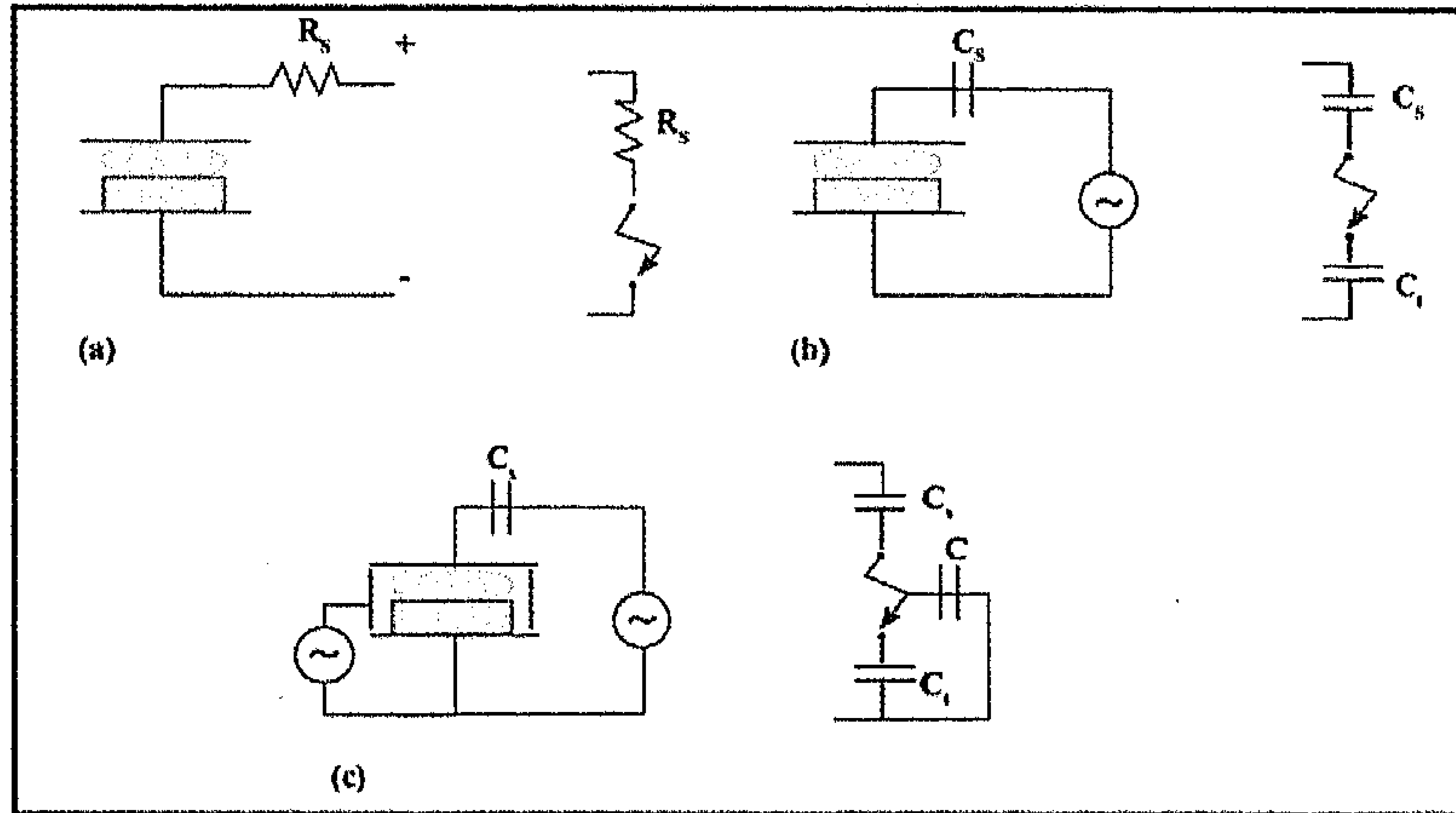
دايود التفريغ الوهاجي:

عمومـا البلازمـا ذات الضـغط المـنخفض لهـا خصـائص مرتبطـة بعمليـات التفريـغ الوهاجي على طول المنطقة العادية وفوق العادية C–E مـن خاصـية التفريـغ (الشـكل 5) حيث التيار والقدرة تكون أعلى قبل تطور القوس ولها جسيمات عالية الطاقة، ولكن عادة ما تكون في حالة توازن الشحنة.



شكل (5): خاصية التفريغ الكهربي تبين منطقة التوهج

مفاعل الدايود هو أداة للبلازما المتعددة الاستعمال تستخدم في أشكال متنوعة في تصنيع أشباه الموصلات. ثلاثة أشكال من الأقطاب ترد في الشكل (6). التفريغات الوهاجية تسمح بمعدلات ترسب أعلى من عمليات شعاع الإلكترون أو الأيون، وتستخدم لترسيب فيلم رقيق بالترشرش من هدف (المهبط) إلى الركازة (المصعد)، أو النمشية بالترشرش من الركازة. التحديد هو استحالة السيطرة على فيض الأيونات بشكل مستقل عن طاقة الأيونات (الجدولان 2 و 3).



شكل (6): مفاعل البلازما الثنائي وأشكال الإمدادات (a) اقتران التفريغ المباشر (b) الاقتران السعوي (c) الاقتران الثلاثي غير المباشر

جدول (2): بارامترات مصادر البلازما المستخدمة في عمليات تصنيع الإلكترونيات الدقيقة

Source	Gas pressure p (Torr)	Electron temperature T_e (eV)	Electron number density (n_e m^{-3})
DC glow	0.1 – 1	1 – 8	$10^{15} - 10^{18}$
Capacitively coupled	0.05 – 1	2 – 4	$10^{15} - 10^{17}$
Inductively coupled	$10^{-4} - 10^{-1}$	1 – 10	$10^{15} - 5 \times 10^{18}$
Magnetron	0.001 – 0.2	2 – 4	$10^{14} - 10^{16}$
Electron cyclotron resonance	$10^{-5} - 10^{-2}$	5 – 15	10^{18}
Microwave	$10^{-3} - 5$	5 – 15	$10^{14} - 10^{17}$
Helicon	0.01 – 0.1010	5 – 15	10^{18} - 10^{19}

جدول (3): بارامترات التشغيل عمليات تصنيع أشباه الموصلات

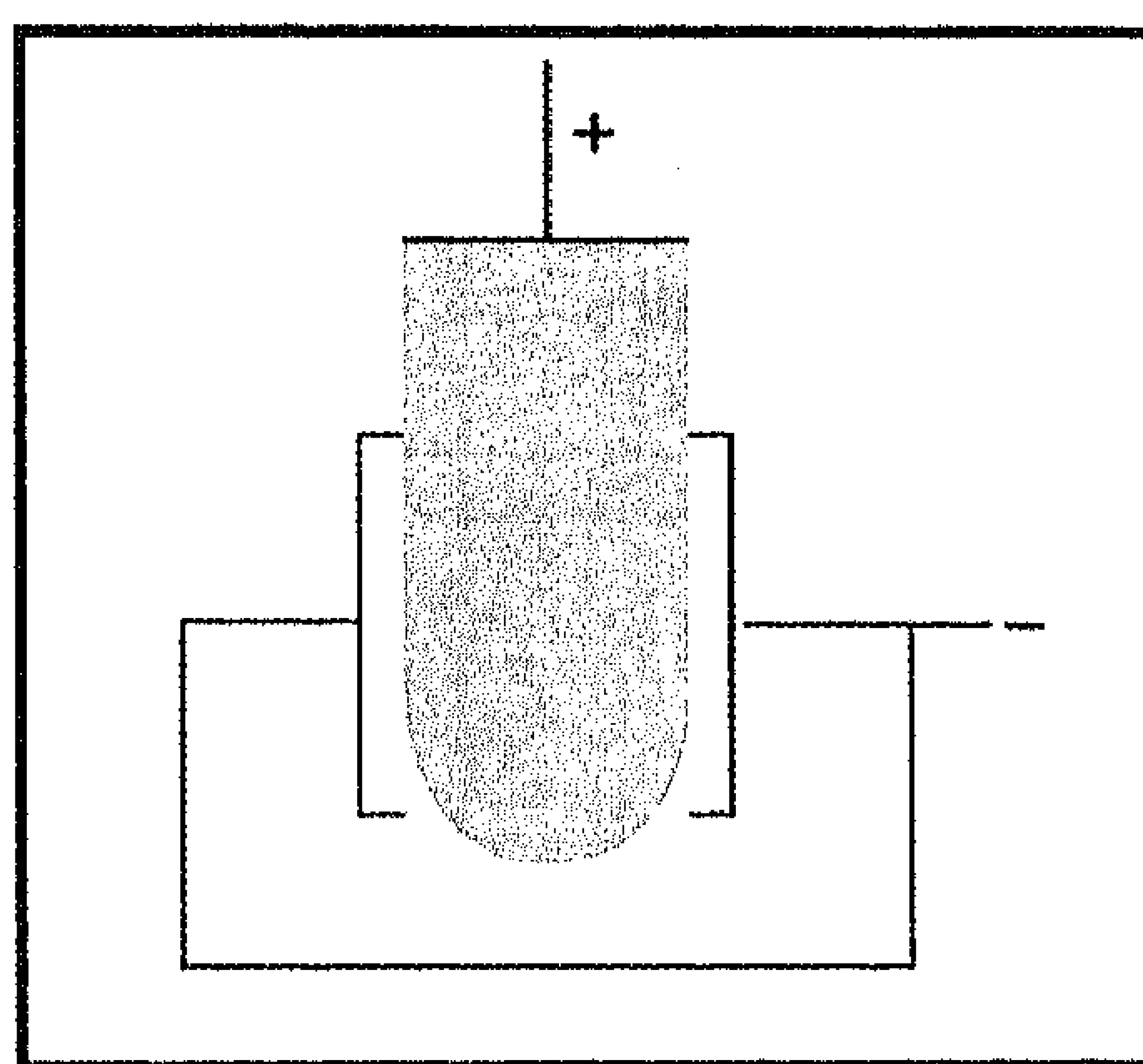
Plasma typegrill	Pressure (Torr)	Ion density (m^{-3})	Degree of ionization
Deposition / etching	< 10	$< 10^{19}$	10^{-6}
Reactive ion etching	$10^{-2} - 10^{-1}$	10^{19}	$10^{-6} - 10^{-4}$
Magnetron sputtering	10^{-3}	10^{20}	$10^{-4} - 10^{-2}$
Electron cyctron	$< 10^{-4} - 10^{-2}$	10^{21}	$< 10^{-1}$

فيض الأيونات (الكثافة العددية) وطاقة الأيونات، ومن ثم معدل الترسيب، يمكن السيطرة عليها بشكل مستقل بإضافة قطب ثالث في الترايود (الشكل C- 6). زيادة التحيز السلبي يزيد من معدل الترسيب المحدد ببداية انبعاث الأيونات الثانوية عند القطب الثالث. يمكن استخدام التحيز الإيجابي للحد من معدل الترسيب. يمكن استخدام المجال الكهربي عند القطب الثالث لتحسين توجه الأيونات المنبثقة حتى وصولها عمودية على سطح الركيزة وتخفض من اختزالية الأخدود المنمش.

ضغط التشغيل النموذجي لدايود البلازما DC (شكل a6) يكون عند جهد تفريغ مقداره 500 فولت إلى 1000 فولت ليصل إلى تيار شدته 0.5 أمبير وكثافة التيار حوالي 10 مللي أمبير لكل ملليمتر، مع فاصل القطب 50 مم. معدل القصف يعتمد على كثافة التيار ومن ثم يعتمد على حجم القطب. والشحنة التحيزية تحد من كثافة التيار وتبلغ قيمته:

$$J_{\text{sat}} = A_0 T^2 \exp\left(\frac{-\phi\, e}{kT}\right) (\text{Am}^{-2})$$

في المهبط الأجوف، الانبعاثات الثانوية من الأيونات المتسرعة في منطقة المهبط الهابط تتأرجح داخل المهبط الأجوف بين الجانبين المعدنيين من المهبط (الشكل 7)، تؤدي إلى زيادة تراكمية في انبعاث الإلكترونات دون مرحلة انتقالية من التوهج إلى القوس. ويمكن زيادة كثافة تيار المهبط ليصل إلى حوالي 10 أضعاف كثافة تيار المهبط العادي دون حدوث انتقال من التوهج إلى القوس.



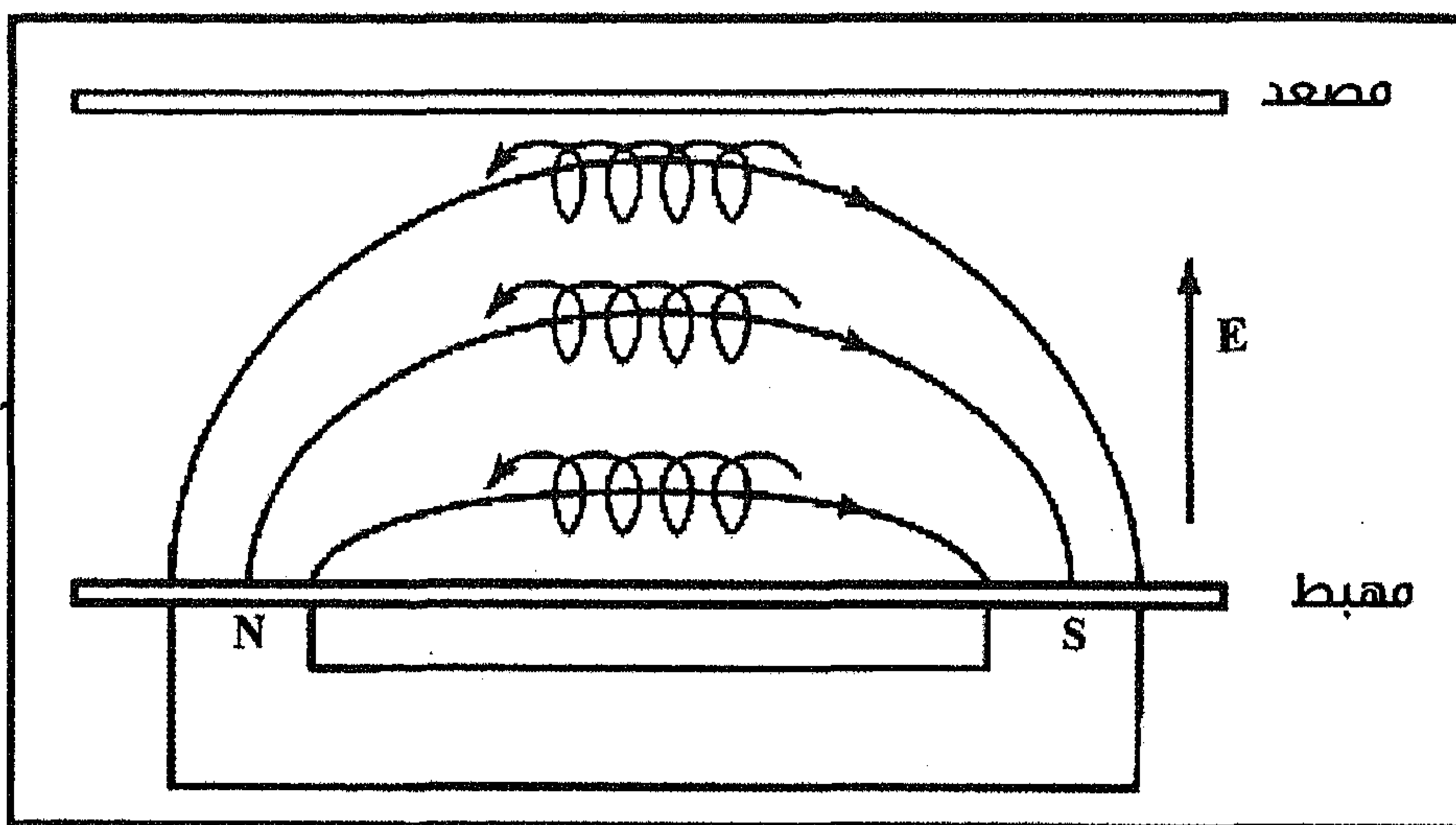
شكل (7): المهبط الأجوف

المغنيطرون:

المغنيطرونات تستخدم لترسيب أفلام رقيقة. الحد من الدايود بوصفه مصدرا للأيونات تكون كثافة الأيونات منخفضة عند الضغط المنخفض (الأقل من 100 باسكال) ضرورية في العديد من عمليات التصنيع الإلكتروني. متوسط المسار الحر

الطويل للإلكترونات ينتج في بعض حالات التصادم مع الذرات المحايدة، التي تصطدم بجدران الوعاء بدلًا من ذلك.

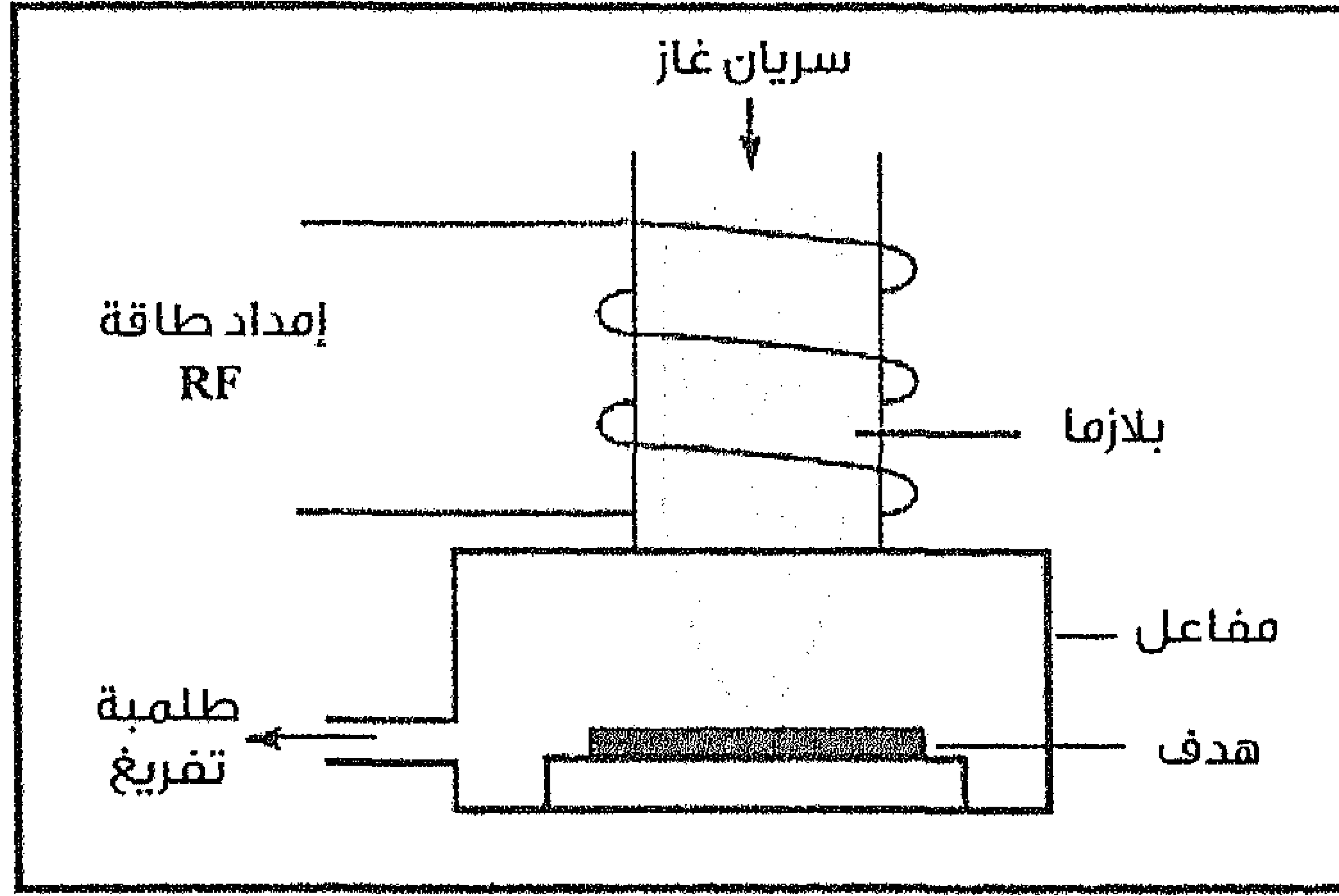
في المغنيطرون، الإلكترونات محاصرة في مجال مغناطيسي مستعرض وراء الكاثود (شكل 8). الإلكترونات تترك الكاثود في منطقة بالقرب من القطب الشمالي للمغناطيس وتتحرك على طول خط الفيض المغناطيسي، ولكن تتطلب طاقة من المجال الكهربي المتعامد على المجال المغناطيسي ليقطع خطوط الفيض.



شكل (8): حركة الإلكترونات في المغنيطرون

اقتران البلازما بالحث (ICP):

بلازما الحث من خلال ملف لولبي بترددات الراديو (الشكل 9) يكون مصدرا مفيدًا لإنتاج البلازما عالية الكثافة مع محور اللولب إما عمودية وإما أفقية لعمليات مثل إزالة الواقي الضوئي.



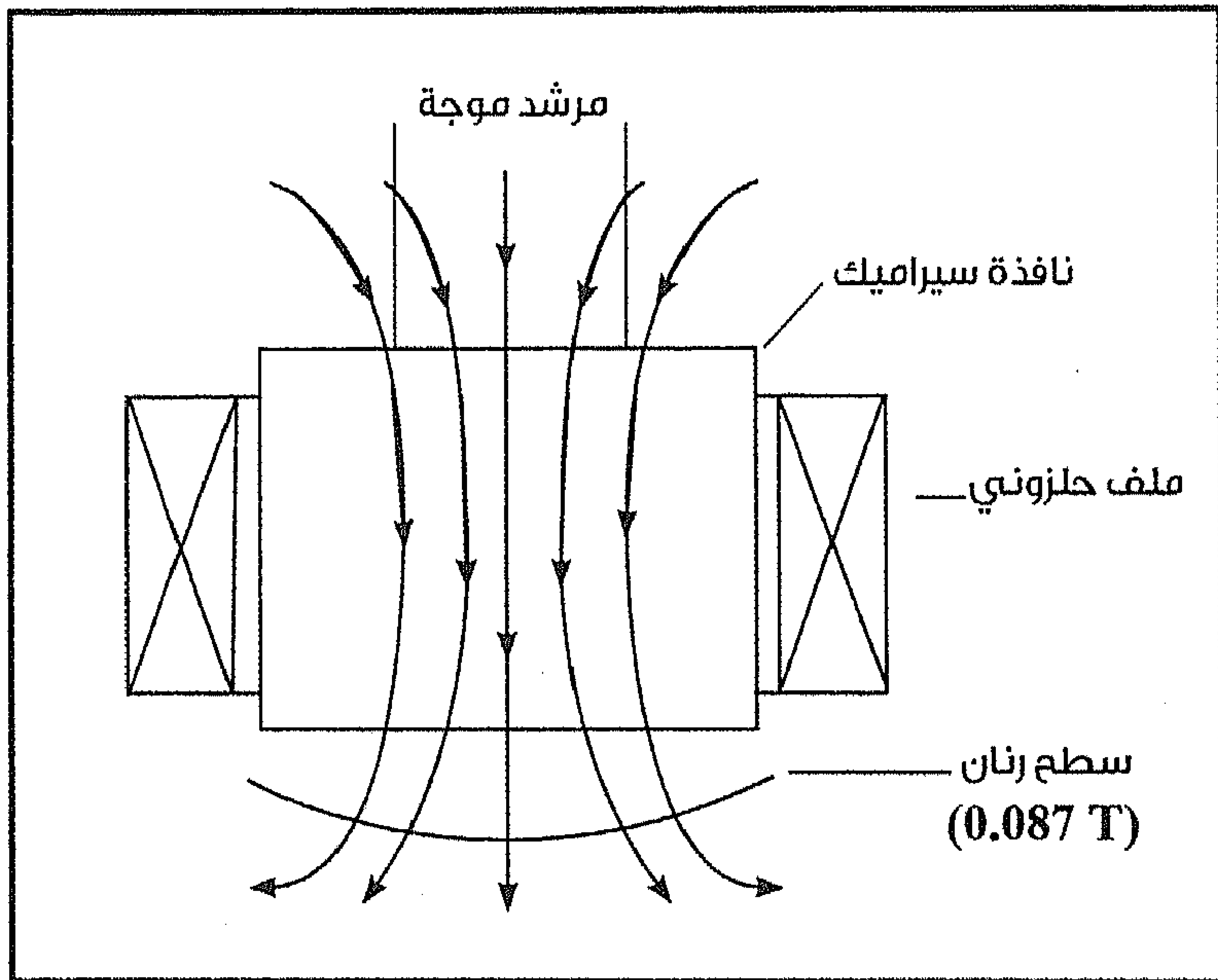
شكل (9): مفاعل البلازما الحثي

مسرع الإلكترون الحلقي الرنان (ECR):

مسرع الإلكترون الحلقي الرنان يمكن أن يستخدم لزيادة الجسيمات المشحونة منخفضة الكثافة والطاقات المنخفضة عند الضغوط المنخفضة، ويستخدم للتنميش وترسب بلازما الأبخرة الكيميائية (PCVD). ويبين الشكل (10) مفاعل مسرع الإلكترون الحلقي الرنان ECR. يحدث امتصاص عالٍ جدًّا من الطاقة على سطح الرنان عند تردد ECR ويمكن اقتران الطاقة للبلازما بالمرشد الموجي وإدخالها إلى غرفة التفريغ عند ضغط حوالي Torr 10^{-5} – 10^{-3} من خلال نافذة كوارتز fused أو مع هوائي.

حزمة الموجة الدقيقة (الميكروويف) تكون مستقطبة استقطابًا دائريا أو استقطابًا مستويًا حيث الموجة المستقطبة لها مركبة مجال عمودي عليها ولا تشارك في تسخين الإلكترونات. شدة المجال الكهربائي في مستوى المرشد الموجي تكون كافية لتأين الغاز وتشكيل البلازما في المفاعل. المجال المغناطيسي على محور المفاعل مجهز بملف. انفراج المجال المغناطيسي يعجل الإلكترونات الدوارة على طول المسارات الحلزونية المتعامدة

على المجال المغناطيسي في اتجاه انفراج المجال. وتنتج كثافة الفيض المغناطيسي المنتظم على المستوى 875 جاوس حيث يكون المجال الكهربائي متعامدًا على المجال المغناطيسي DC الخارجي الذي عنده تردد رنين البلازما مساو للتردد التدويمي. الإلكترونات يتم تسخينها في هذه المنطقة وتمرر طاقتها إلى الأيونات التي تتحرك ببطء. الأيونات التي تتحرك ببطء تعجل أيضا في نفس الاتجاه وكبح جماح الإلكترونات بالانتشار مثنوي القطبية بغية الحفاظ على حيادية البلازما. الجدول (4) يوضح المقارنة بين مسرع الإلكترون الحلقي الرنان (ECR) والبلازما المقترنة سعويا بالترددات اللاسلكية RF.



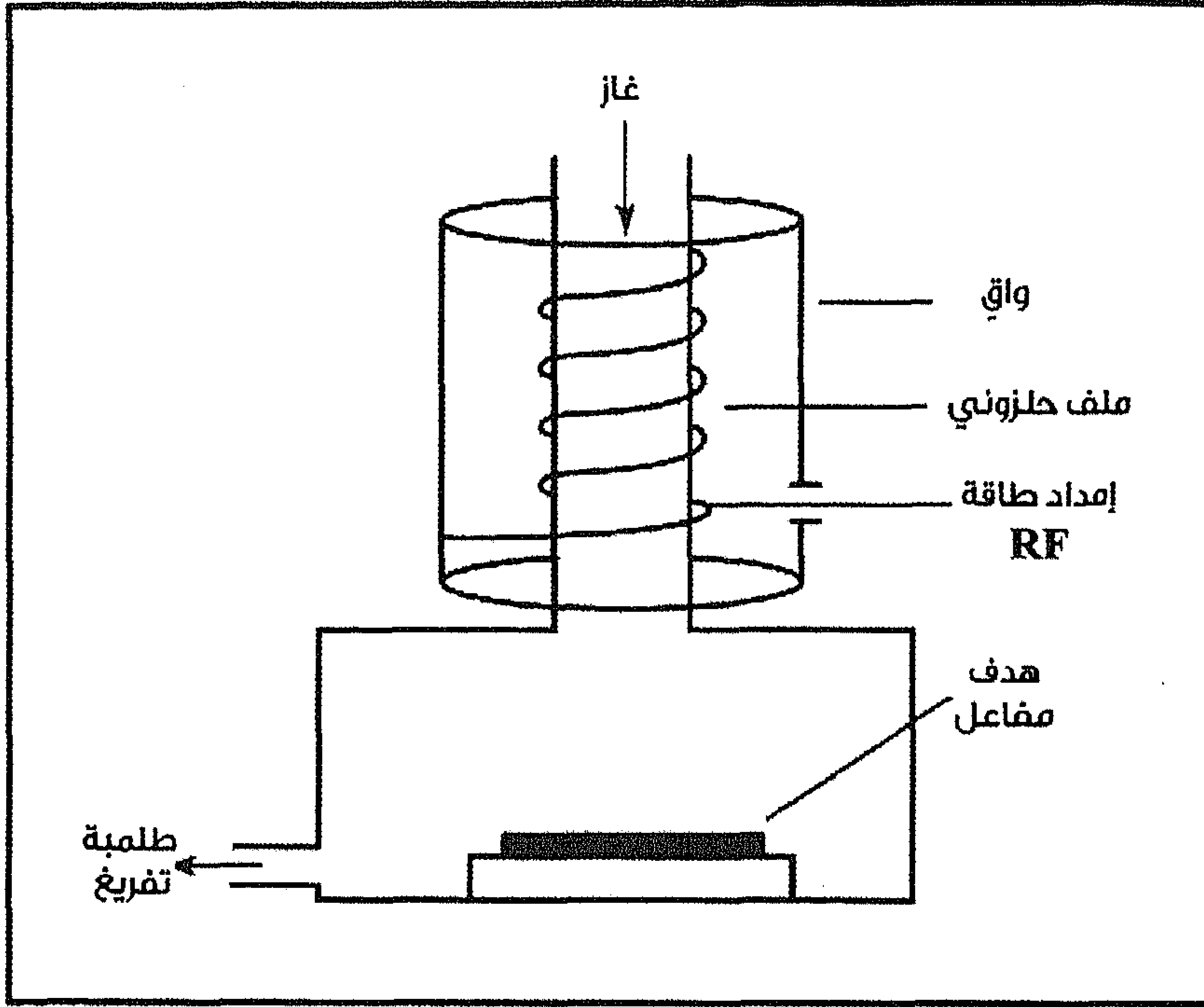
شكل (10): مفاعل الإلكترون الحلقي الرنان (ECR)

جدول (4): مقارنة بين خصائص بلازما RF وبلازما ECR

Parameter	ECR	RF
Plasma diameter (mm)	100	100
Plasma length (mm)	200	50
Frequency	2.45 GHz	13.56 MHz
Power (W)	500	200
Gas pressure (Pa)	0.0352 (0.4 × 10^{-3} Torr)	1.06 (75 × 10^{-3} Torr)
Electron temperature T_e (eV)	10	5
Electron number density n_e (electrons m^{-3})	10^{17}	10^{16}
Degree of ionization	10^{1}	10^{-2}

المفاعل الحلزوني:

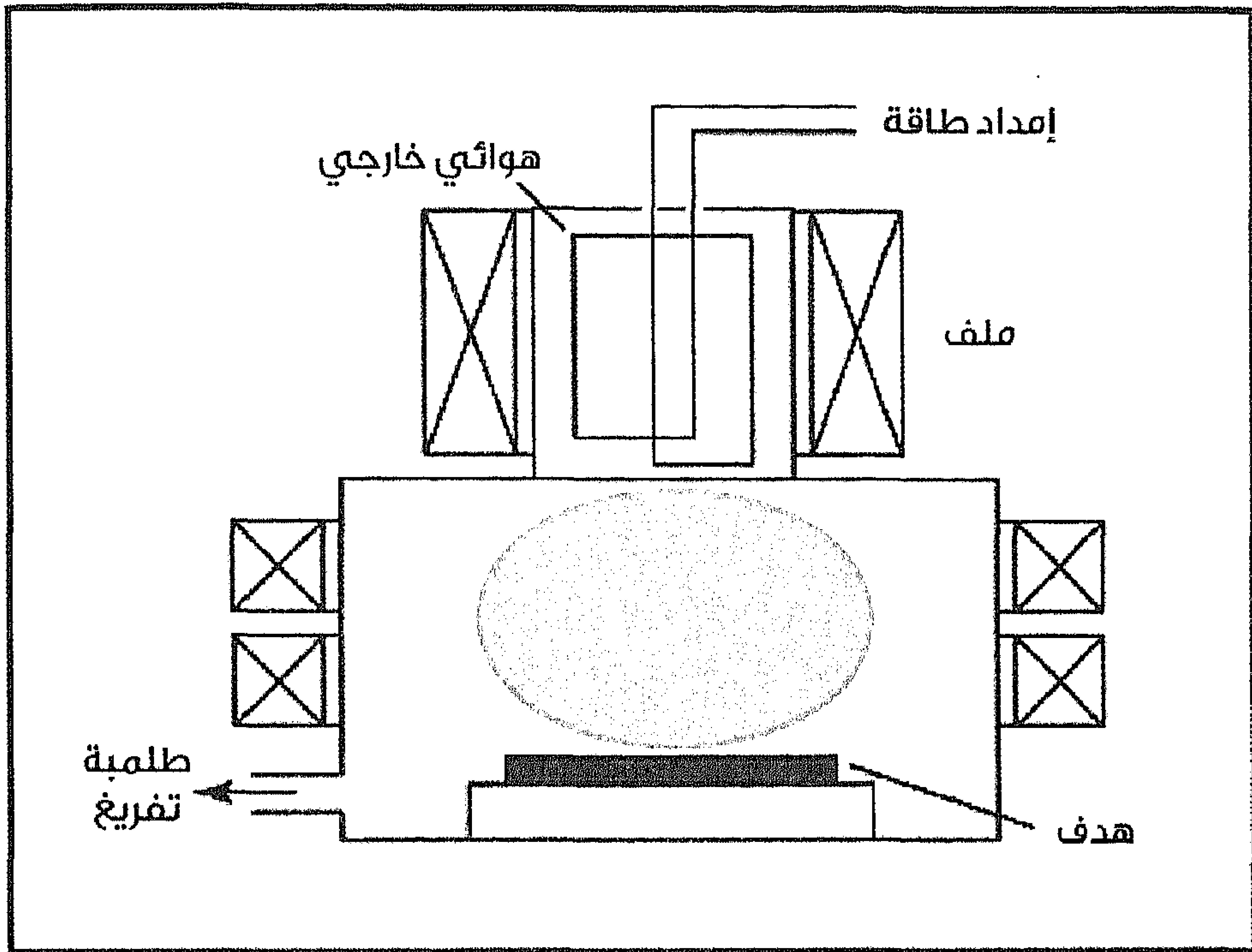
ويستخدم المفاعل الحلزوني (الشكل11) الملف اللولبي الذي يرنن عند نصف أو ربع الطول الموجي لتردد مصدر الإمدادات بالطاقة المحاط بأسطوانة متمحورة متأرضية (متصلة بالأرضي) مكونة خط انتقال مع موصل مركزي حلزوني. العملية عند ضغط منخفض حوالي 10^{-2} ملليمتر زئبقي. الملف اللولبي يتصرف كخط إرسال وتتولد موجات كهرومغناطيسية مستقطبة دائريا مع حدوث الإشعاع بقيمة عظمى على طول المحور الحلزوني. سرعة المجال الكهربائي تحدد بخطوة الحلزوني وهو جزء صغير من سرعة الضوء. المجال الناشئ عن التيار في الحلزوني يعدل سعة الإلكترونات بزيادة طاقتها على طول الحلزوني تقريبا كمربع طول المحور الحلزوني.



شكل (11): المفاعل الحلزوني

المفاعل الهليكوني:

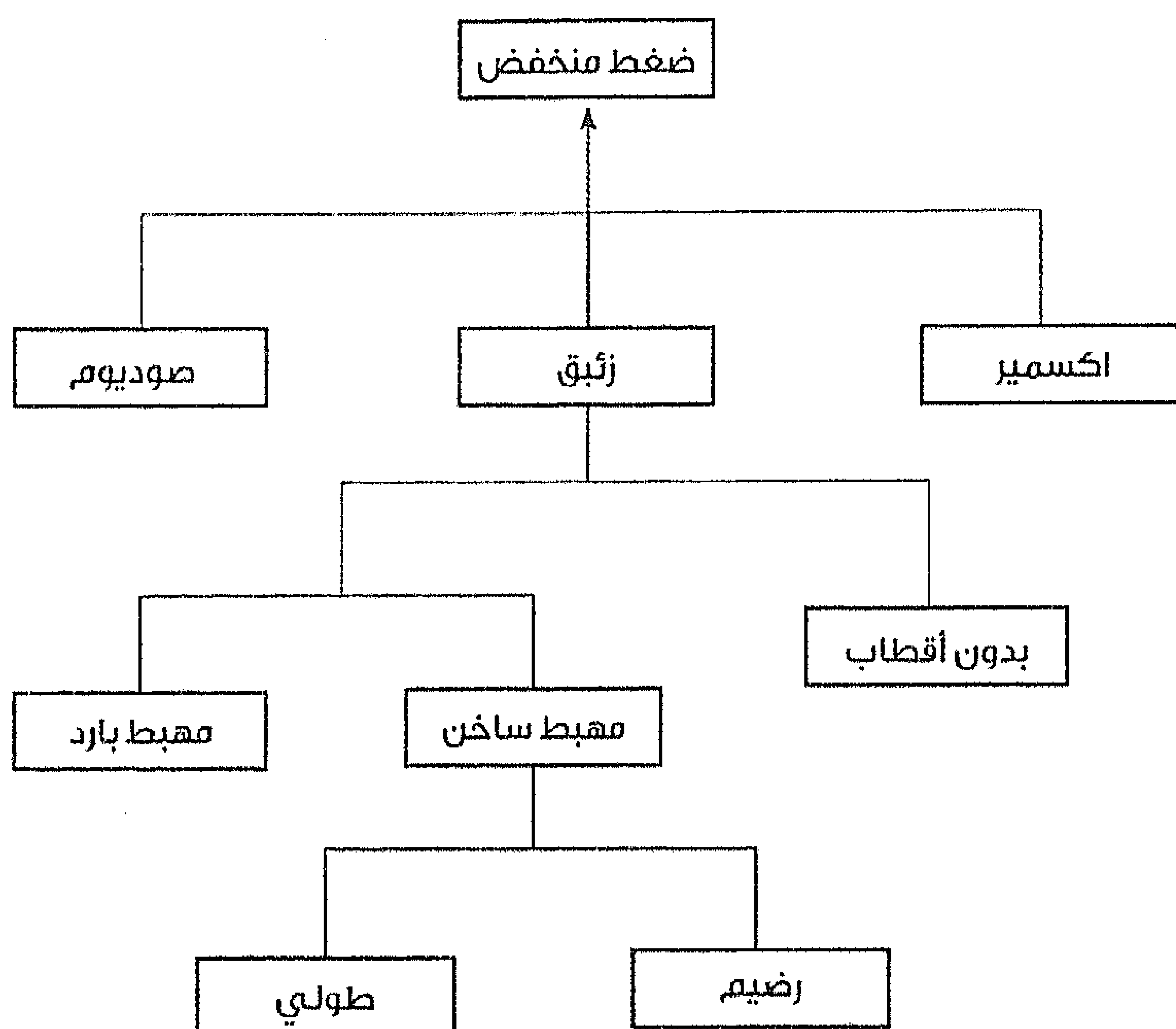
إمدادات الطاقة إلى الهوائي خارج المفاعل الهليكوني (الشكل 12) تؤدي إلى تخليق المجال الكهربي العمودي على المجال المغناطيسي داخل الملف DC. يقترن المجال المغناطيسي الضعيف من مصدر اللولب (0.005 تسلا) بطاقة الترددات اللاسلكية في نمط الهليكون داخل مركز البلازما بدرجة معينة من الحصر عند مركزها، التي تنتشر داخل الغرفة المنخفضة حيث إنها محصورة بالملف الثاني (0.007 تسلا). الإلكترونات تميل إلى اتباع الأيونات التي يتم تعجيلها في المجال المنفرج على طول محور الملف ليحد من اختلال توازن الشحنة. يتم نشر موجة صوتية طولية في اتجاه المجال المغناطيسي وتوجه الإلكترونات في البلازما على غرار خطوط الفيض المغناطيسي، وتتبعها الأيونات بالانتشار مثنوي القطبية، التي تعمل لكبح القصور الذاتي لتحييد فصل الشحنة.



شكل (12): رسم تخطيطي لمفاعل هليكوني

التفريغ ذو الضغط المنخفض ومصابيح البلازما:

ينبعث جزء من طاقة البلازما والتفريغ الكهربي بإعادة الاتحاد من حالات الإثارة أو التأين في المنطقة المرئية من الطيف (350 – 700 نانومتر)، ومع ذلك، معظم الطاقة تشع كطاقة حرارية عن طريق التوصيل أو الحمل الحراري. ويبين الشكل (13) التسلسل الهرمي لمصابيح التفريغ التوهجي المختلفة ذات الضغط المنخفض. ألوان البلازما في عمود التفريغ تكون مميزة بالغاز (الجدول 5) وتتسم بالحساسية لنوع الغاز وتيار التفريغ ووجود كميات صغيرة جدًّا من الشوائب.



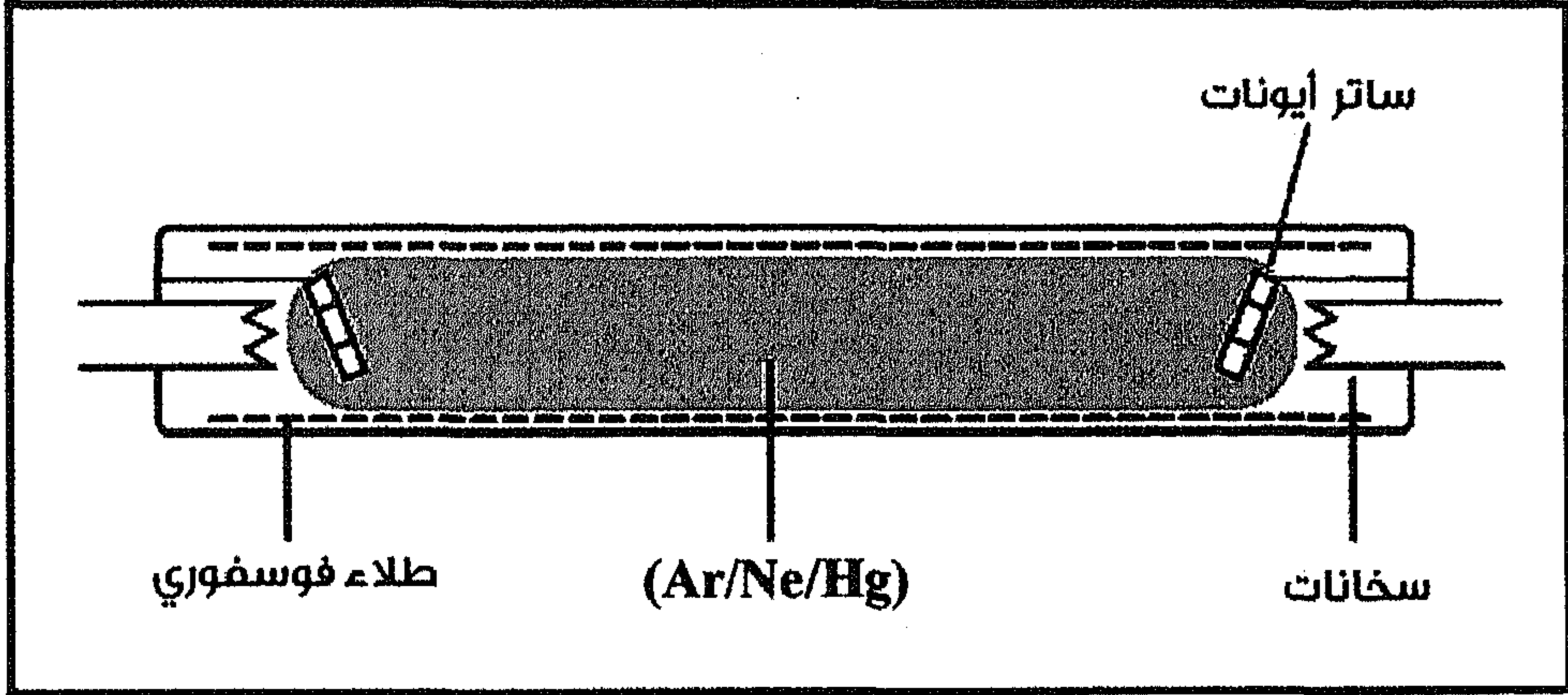
شكل (13): مصابيح التفريغ المختلفة ذات الضغط المنخفض

جدول (5) خصائص الألوان لبعض الغازات والأبخرة في التفريغ الوهاجي

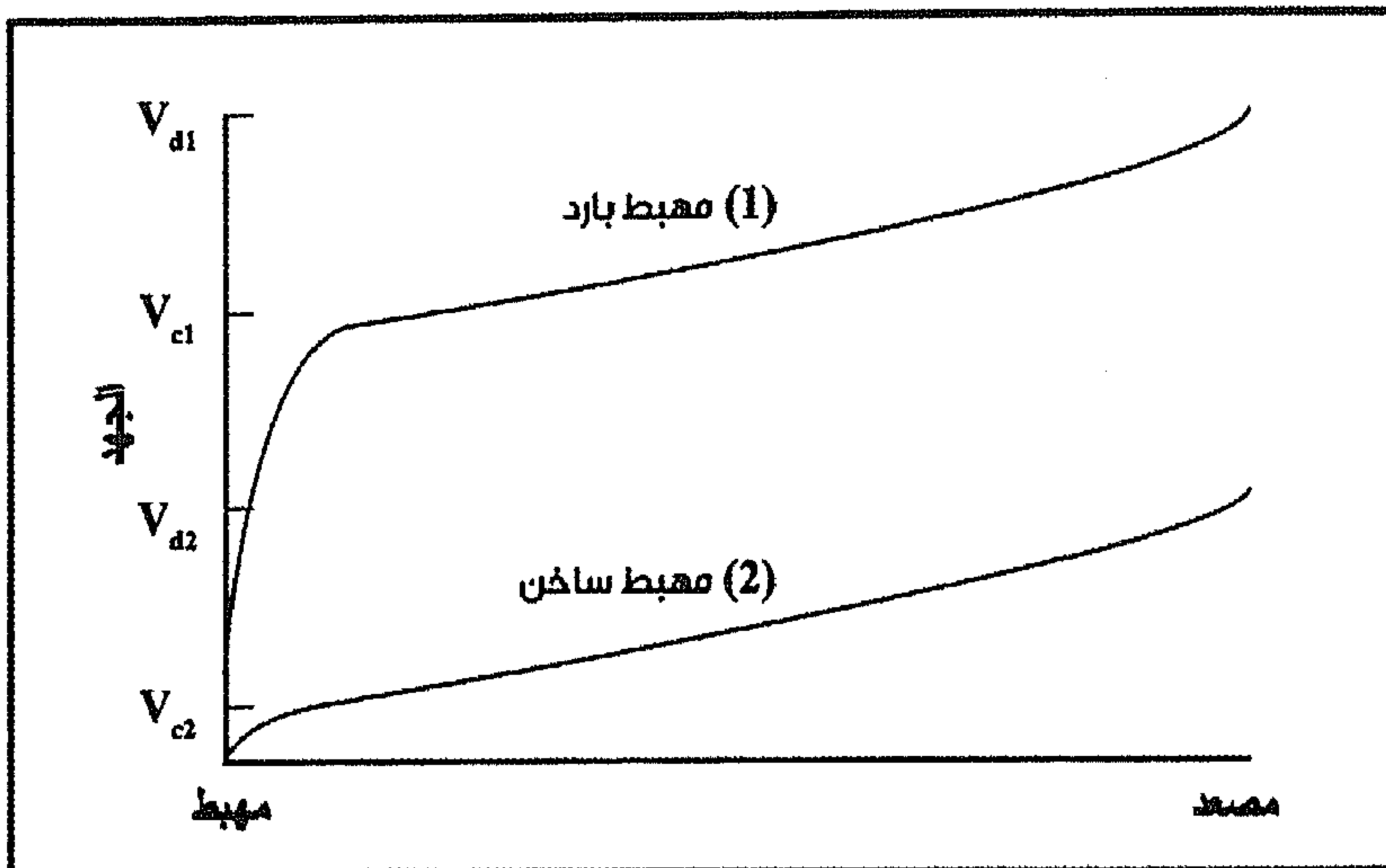
Gas	First cathode	Negative glow	Positive column
Helium	Red	Green	Red to violet
Argon	Pink	Dark blue	Dark red
Neon	Yellow	Orange	Brick red
Krypton	-	Green	-
Xenon	-	Olive green	-
Air	Pink	Blue	Pink
Hydrogen	Brownish red	Pale blue	Pink
Nitrogen	Pink	Blue	Red
Oxygen	Red	Yellowish white	Pale yellow with pink centre

لمبة البخار الزئبقي ذات الضغط المنخفض:

يستخدم تفريغ البخار الزئبقي ذو الضغط المنخفض في «مصابيح الفلوريسنت» في وجود الغازات الخاملة أحادية الذرة التي لها مستويات إثارة شبه مستقرة مع جهد انهيار منخفض. التيار المتردد من العملية يمنع هجرة الأيونات الموجبة إلى المهبط بالاستشراب، والأقطاب المصنوعة من النيكل تعمل على تقليل الترشرش. المهبط الحار لمصباح البخار الزئبقي ذي الضغط المنخفض (شكل 14) يستخدم الباعث الأيوني الحراري ليصل إلى جهد المهبط الهابط المنخفض حوالي 15 فولت، وقوس الابتعاث الأيوني المميز بكثافة التيار المرتفعة نسبيا لتحقيق كفاءة أعلى من المهبط البارد (الشكل 15).



شكل (14): مصباح تفريغ بخار الزئبق ذو الضغط المنخفض



شكل (15): تغير الجهد بين أقطاب كل من التفريغ الوهاجي والقوس الترميوني

لمبات المهبط البارد ذات الضغط المنخفض:

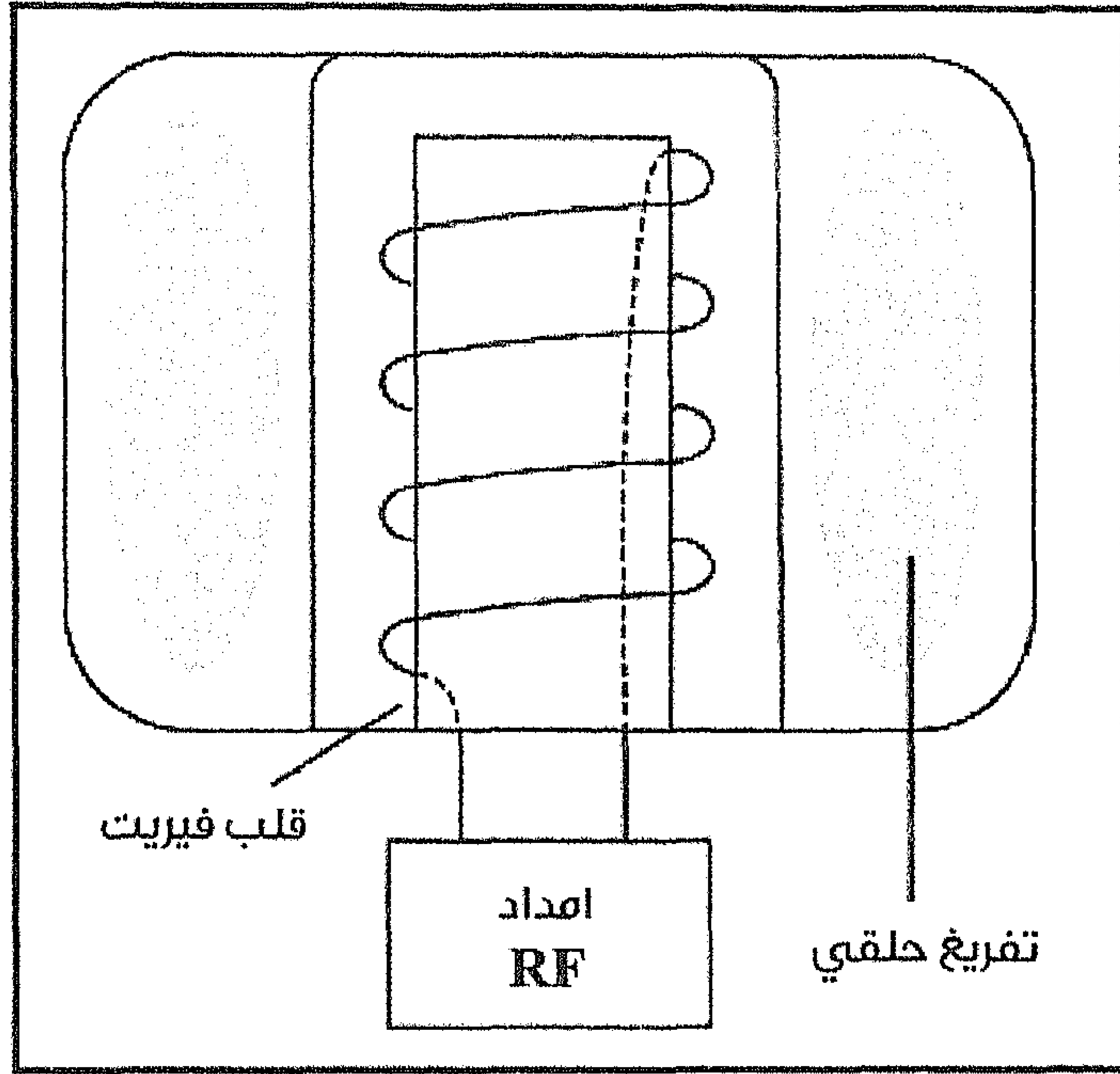
مصابيح المهبط البارد ذات الضغط المنخفض مثل مصابيح النيون تشبه مصابيح المهبط الساخن للبخار الزئبقي لكن جهد هبوط المهبط البارد يصل إلى 400 فولت. طيف الانبعاث من الغاز (الجدول 6) عند ضغط يتراوح بين 6 و20 ميلليمتر زئبق، أوالطلاء الفوسفوري من داخل الأنبوب إذا تم استخدام الزئبق. والغازات المستخدمة تشمل الكريبتون والزينون والأرجون.

جدول (6) مناطق طيف الأشعة فوق البنفسجية

UV band	Wavelength (nm)	Photon energy (eV)
UV A	400 – 315	3.1 – 3.9
UV B	315 – 280	3.9 – 4.4
Actinic	320 – 200	4.4 – 12.4
Vacuum UV	200 – 100	6.2 – 12.4

مصابيح الضغط المنخفض عديمة الأقطاب:

مصابيح الضغط المنخفض عديمة الأقطاب تشبه مصابيح التفريغ الزئبقي ذات الضغط المنخفض، ولكن يستخدم التفريغ الوهاجي المقترن بالحث الحلقي الذي يعمل عند تردد 20 كيلو هرتز. الملف الابتدائي يكون ملفوفًا على قلب محول حديدي يحيط بالمصباح الزجاجي الحلقي (شكل 16). والملف الثانوي هو التفريغ الحلقي المكون من لفة أحادية.



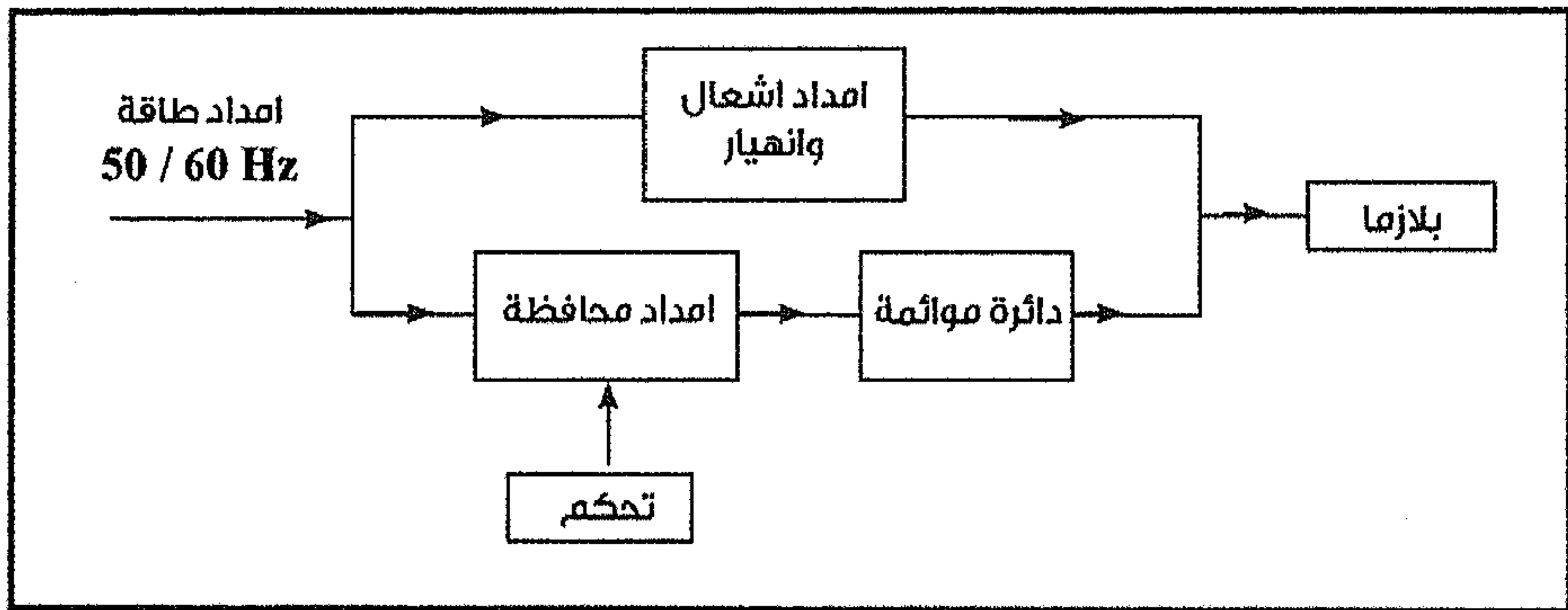
شكل (16): مصباح الحث عديم الأقطاب

الفصل الثامن

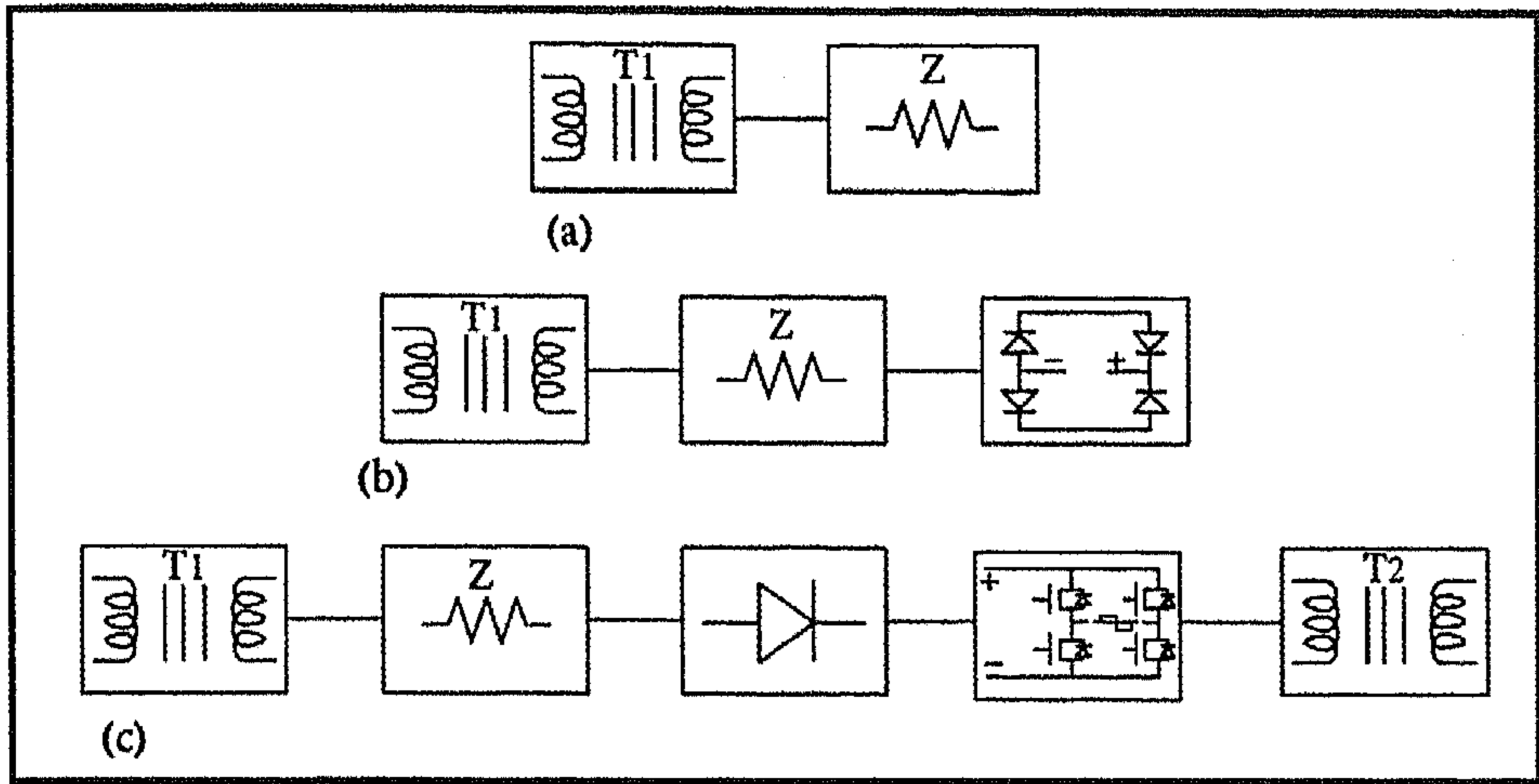
إمدادات الطاقة للبلازما

مقدمة:

الطاقة المتحررة من مصادر إمدادات الطاقة إلى البلازما تحدد بالحالة الديناميكية للبلازما. تتأثر هذه الطاقة بعدة عوامل أهمها التيار الكهربائي والجهد وضغط الغاز والشوائب وغازات التشغيل، مما يجعل من المستحيل تحليل سلوك البلازما وإمدادات الطاقة بصورة مستقلة. متطلبات تصميم إمدادات الطاقة تبدأ مع متطلبات البلازما، في الدرجة الأولى القدرة الكهربية وكثافتها عند ضغط التشغيل، الغاز... وهكذا. بارمتر البلازما الرئيسي هو هبوط الجهد الكهربي عبر البلازما والطاقة المطلوبة، ومن ثم شدة التيار الكهربي والمعاوقة الكهربية لإعطاء القدرة المطلوبة. كثافة الطاقة، تعمل مرة أخرى على مطابقة إمداد الطاقة إلى البلازما. الوظائف المختلفة لإمدادات الطاقة توضح بالشكل (1). ويرد في الشكل (2) مكونات إمدادات الطاقة الرئيسية.



شكل (1): الأجزاء الفعالة في إمدادات الطاقة إلى البلازما



شكل (2): رموز ومكونات إمدادات الطاقة (a) إمداد طاقة التردد (b) إمداد التقويم (c) القلاب

ملفات الحث والمحولات (Transformers and Inductors):

الملفات والمحولات مهمان لضمان الاستقرار والتوافق بين المكونات المستخدمة في إمدادات الطاقة للبلازما ومن خلالها يتم التحكم في الجهد الكهربي، التيار والقدرة. بلازما التيار الثابت DC تستخدم التقويم للتيار المتناوب AC المستقر من خلال اتصال ملف الحث على التوالي مع مدخل AC إلى المقوم. قد يكون الملف متصلًا أيضا في إمداد DC لتنعيم الإخراج وزيادة استقرار تيار التفريغ بالمقارنة مع تحديد نقطة التشغيل.

المكونات الملفوفة مثل الملفات والمحولات قد تكون ذات قلب هوائي أو قلوب فيرومغناطيسية، والمادة الفيرومغناطيسية توفر مسار ممانعة أقل للفيض المغناطيسي من الهواء. يمكن استخدام صفائح رقيقة من الصلب إلى حوالي 10 كيلوهرتز، عندما تصبح مفقودات التيارات الدوامة المستحثة الناشئة عن التيارات الدوارة في القلب ذات أهمية.

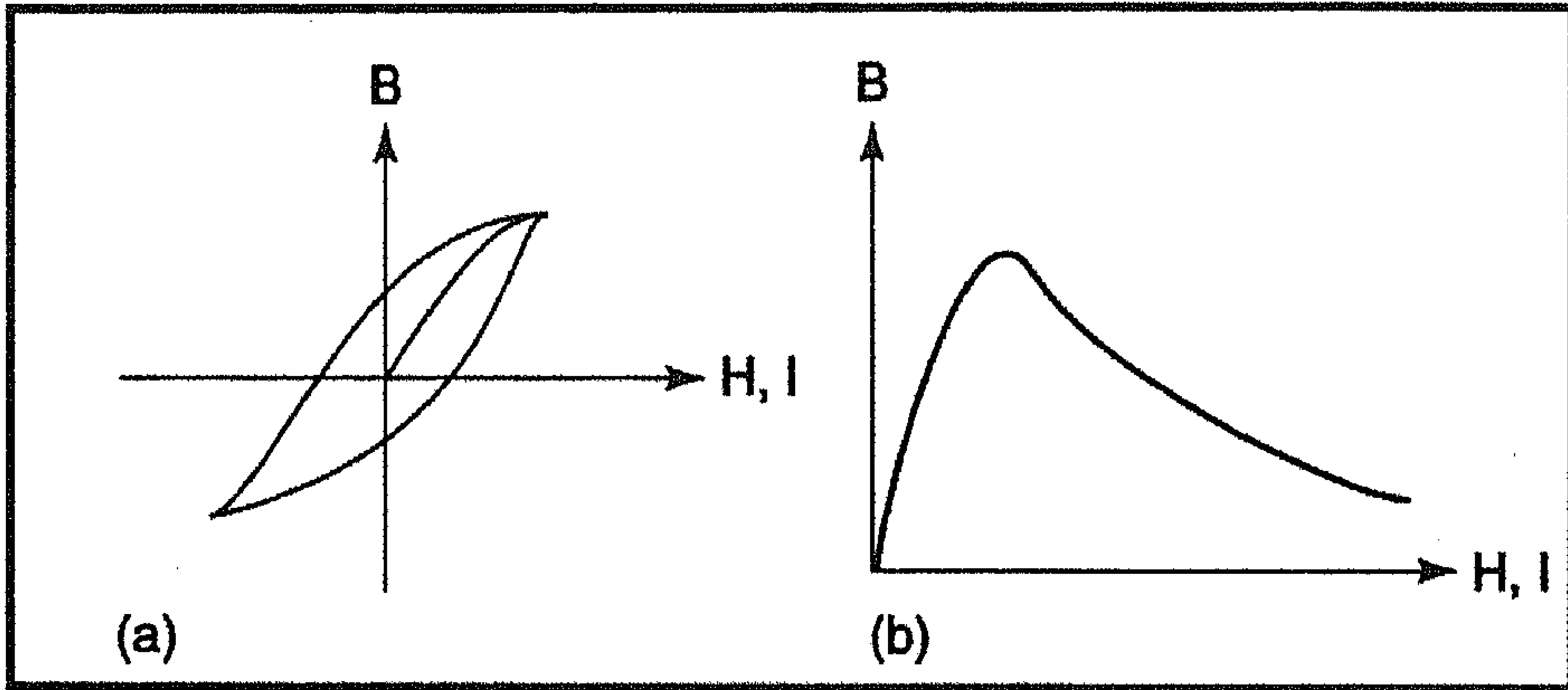
للتعبير عن الجهد والحث نستخدم قانون لينز وقانون فارادي:

$$e = N\mathrm{d}\phi / \mathrm{d}t \quad \text{و} \quad e = -L\mathrm{d}i / \mathrm{d}t$$

$$L = N\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}i} = N\frac{\mathrm{d}BA}{\mathrm{d}i} = \frac{N^2 A\mu_0\mu_r}{l}$$

$$\hat{V} = -N\frac{d\phi}{dt} = \omega\hat{B}AN^2$$

يتضح من المعادلة الخاصة أن الحث L يعتمد على قيمة السماحية النسبية μ_r التي تتغير مع التيار ومادة الدارة المغناطيسية (الشكل 3).

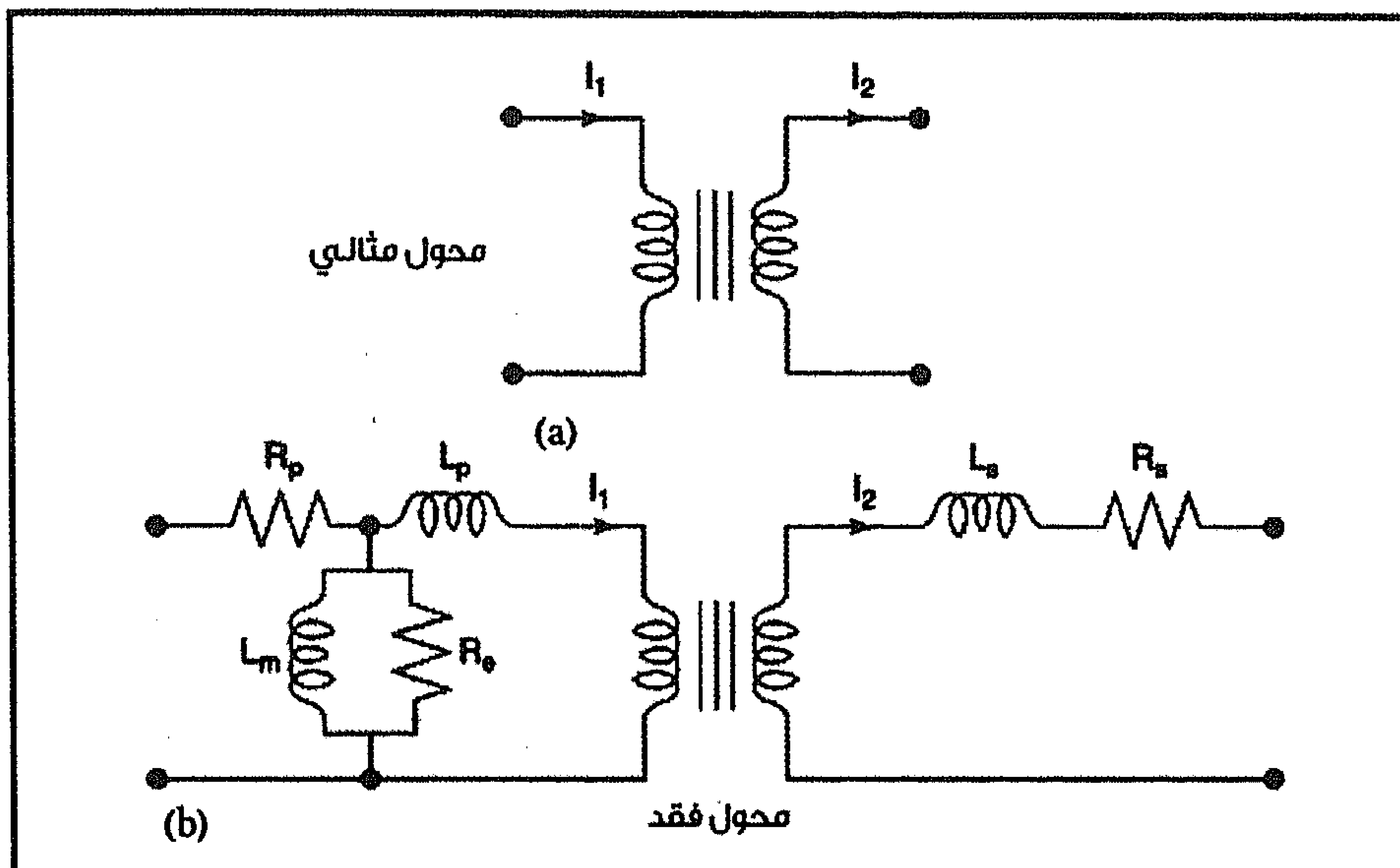


شكل (3): تغير كثافة الفيض المغناطيسي (B) والسماحية النسبية (μ_r) مع المجال المغناطيسي (H)

وتستخدم المحولات في إمدادات الطاقة للبلازما لعزلها من إمداد قدرة التردد وأيضا لمطابقة حمل البلازما بمصدر الإمداد ولإنتاج الفولطيات العالية للاشتعال. المحول المثالي مبين في الشكل (4a) وهو تقريب جيد للعديد من التطبيقات عند تردد القدرة الكهربية، حيث مفاعلة التسرب بين لفائف المحولات منخفضة، ولكن ليس دقيقا عند الترددات العالية. معادلة الجهد الكهربي للمحول المثالي تكون:

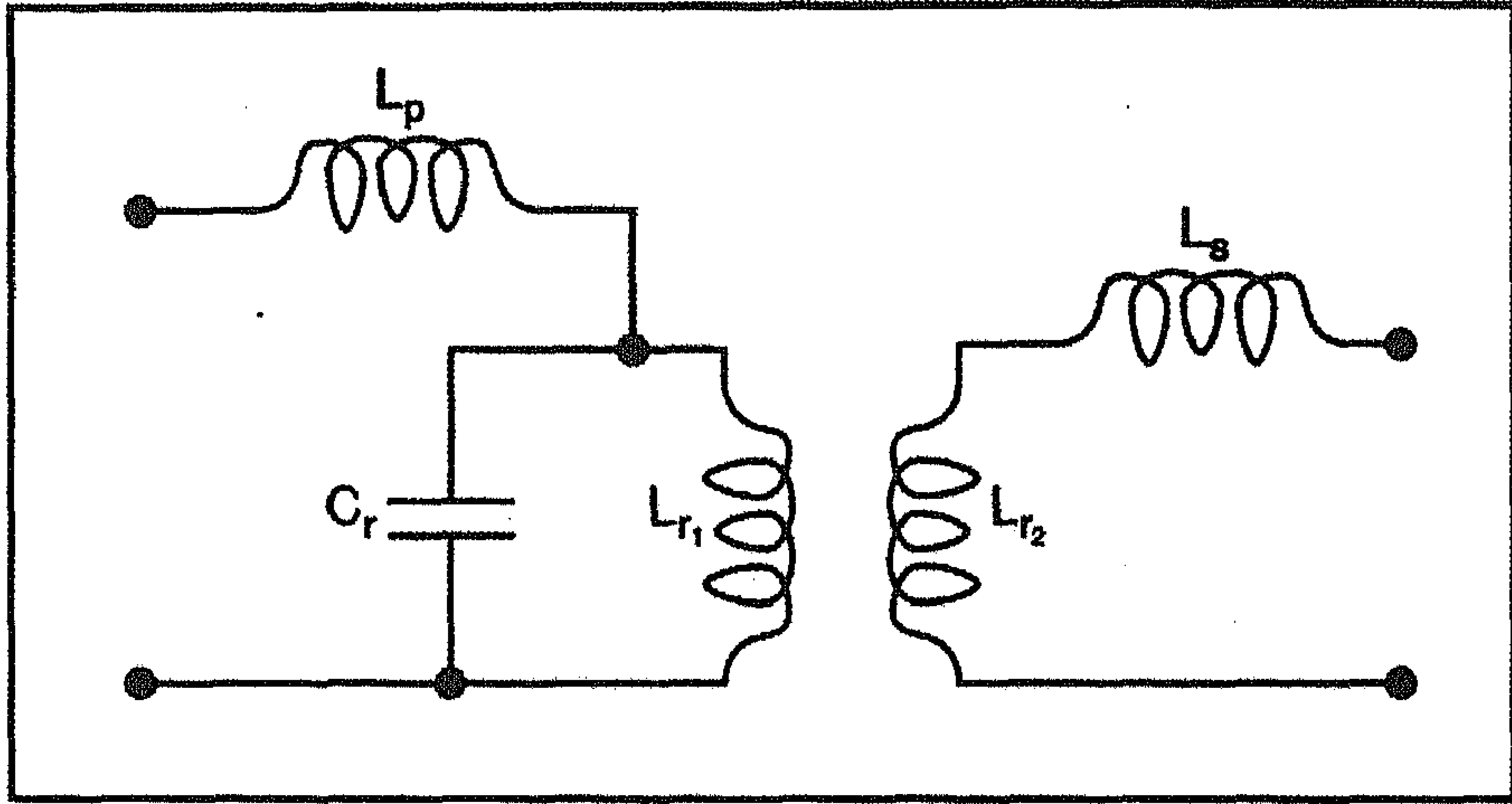
$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad \text{and} \quad I_p N_p = I_s N_s$$

حيث V_p و N_p هما جهد وعدد لفات الملف الابتدائي، V_s و N_s هما جهد وعدد لفات الملف الثانوي على الترتيب و I هو شدة التيار.



شكل (4): الدوائر المكافئة للمحول (a) محول مثالي (b) محول فقد

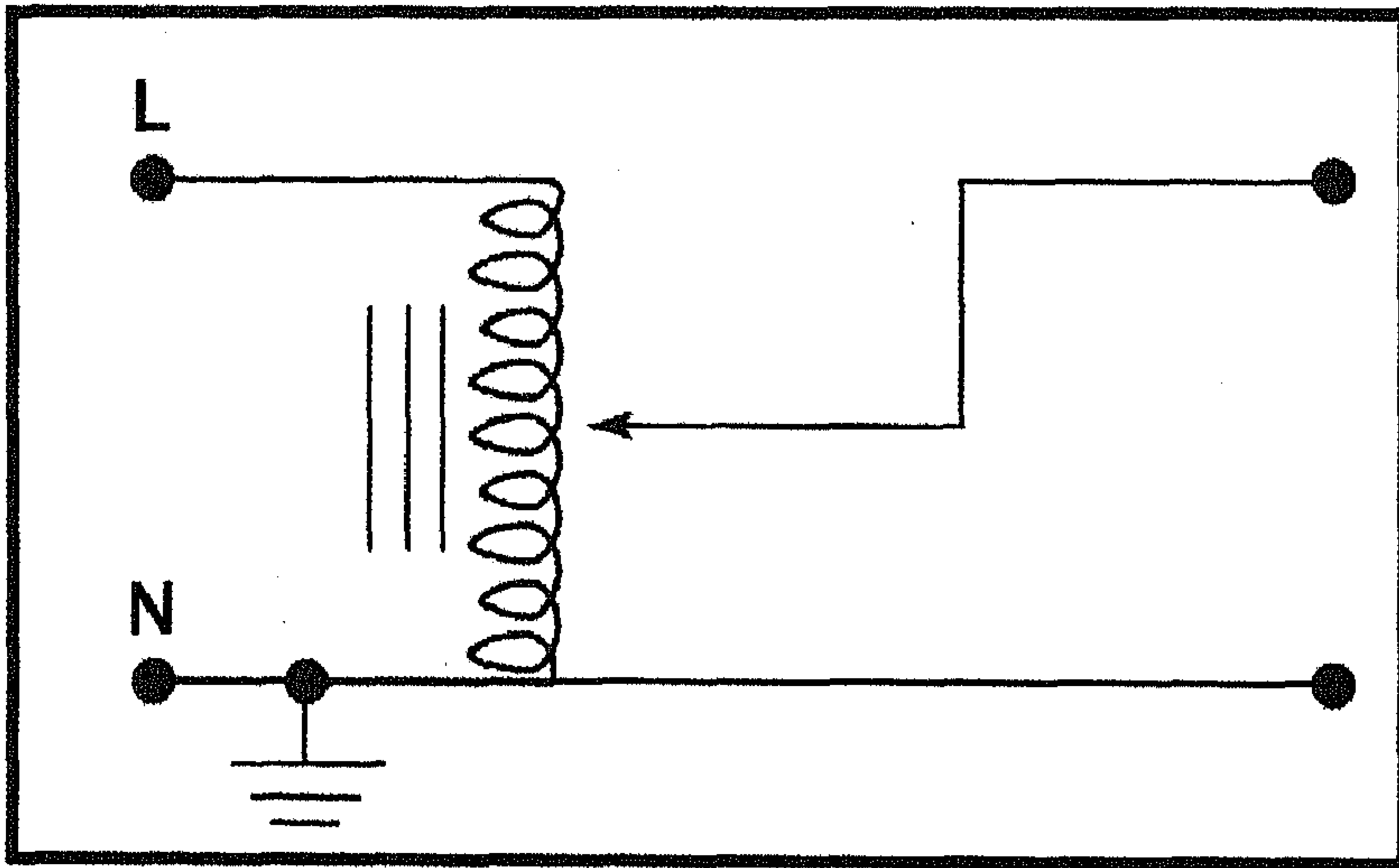
عند الترددات العالية، مفاعلة التسرب لقلب المحول الحديدي تكون عالية. عند الترددات الأكبر من 1 ميجا هيرتز، أحيانا يستخدم محول تسلا ذو القلب الهوائي (شكل 5). يتمتع محول تسلا ذو القلب الهوائي بحث تسرب منخفض ويمكن أن يكون رنينيًّا عند الترددات العالية باستخدام الحث الذاتي والسعة الذاتية للفائف المحول. يتم الحصول على جهد الخروج عند تردد الرنين $f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_t C_c}$ حيث L_c and L_t هما الحث الكلي التأثيري والسعوي للمحول على الترتيب.



شكل (5): الدائرة المكافئة لمحول تسلا ذي القلب الهوائي

يمكن تغير جهد الخروج للمحول بتغير عدد لفات الملف الثانوي بنقـاط تفـرع ثابتـة.

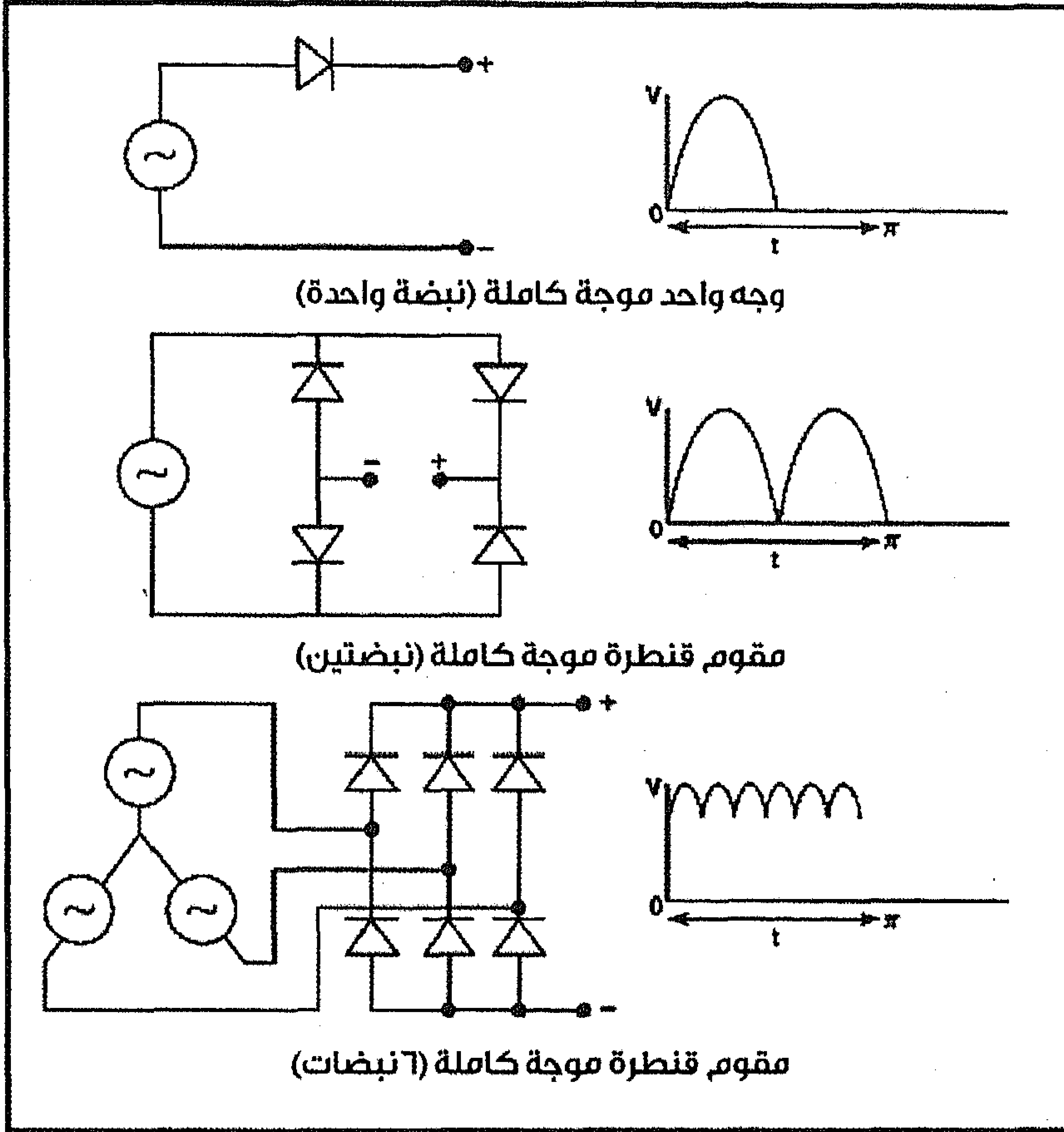
المحول التلقائي له لفة أحادية بتفرعات ثابتة أو نقاط تفرع تتغير باستمرار (الشكل 6).



شكل (6): المحول التلقائي

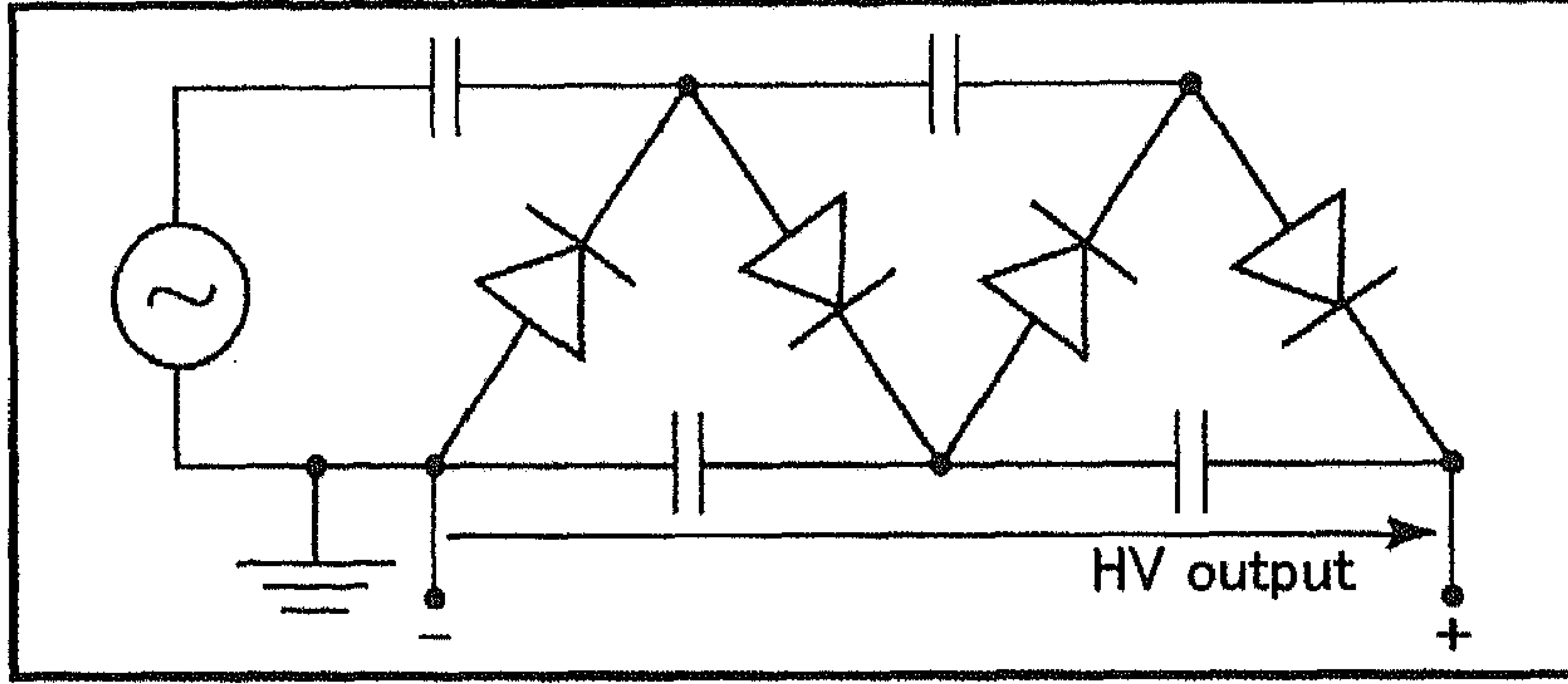
التقويم (Rectification):

الشكل (7) يبين بعض أشكال التقويم وخروجها. خرج المقوم يكون سلسلة من النبضات المقومة، يحدث تنعيم للخروج بأعلى عدد من النبضات. والخروج من المقوم يتصل بمكثفات ذات قدرة كبيرة للتنعيم.



شكل (7): أشكال التقويم ومخرجات أشكال الموجة

يمكن استخدام دوائر التقويم كمضاعف للجهد. الشكل (8) يوضح استعمال المقومات نصف الموجية كمضاعف للجهد لإمداد الجهد العالي عند تيار منخفض.

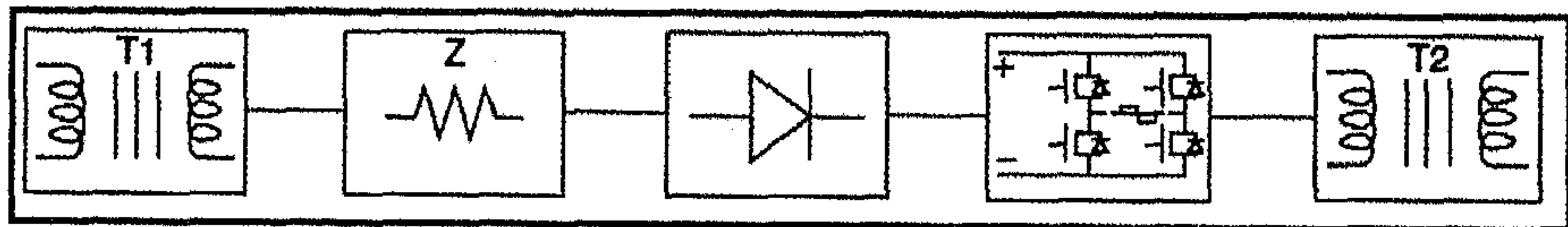


شكل (8): مضاعف الجهد ذو النصف موجة

مصادر إمدادات الطاقة من أشباه الموصلات (Semiconductor Power Supplies):

مفهوم إمدادات المقوم العكسي (يحول التيار المستمر إلى تيار متناوب) بسيطة حيث تستخدم في المعدات الاستهلاكية منخفضة التكلفة مثل المحولات DC–AC، مصابيح التفريغ وإمدادات اللحام. القصور الذاتي الحراري المنخفض لقدرة أشباه الموصلات يتطلب المزيد من الحماية ضد ظروف الخطأ المحتمل عن المكونات غير الفعالة.

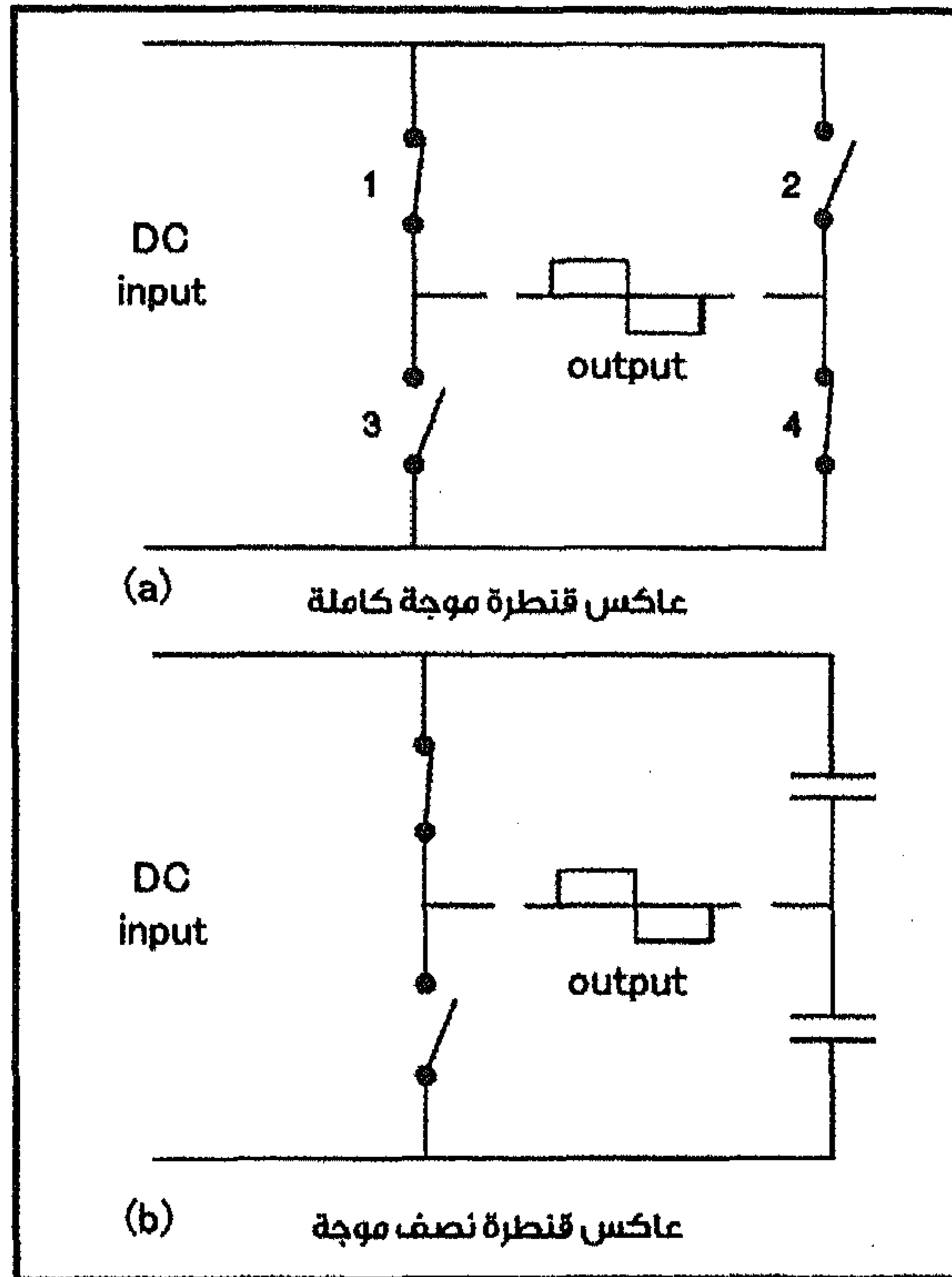
يبين الشكل (9) المكونات الأساسية للمقوم العكسي. طاقة الدخول تكون عادة عند جهد تردد قدرة الإمداد بدون محول باستخدام إما المقوم ذي الوجه الواحد أو ثلاثة أطوار من دون محول، والخروج ليس معزولًا عن إمداد الدخول الذي قد يثير مشاكل العزل.



شكل (9): المكونات الأساسية في إمدادات المقوم العكسي

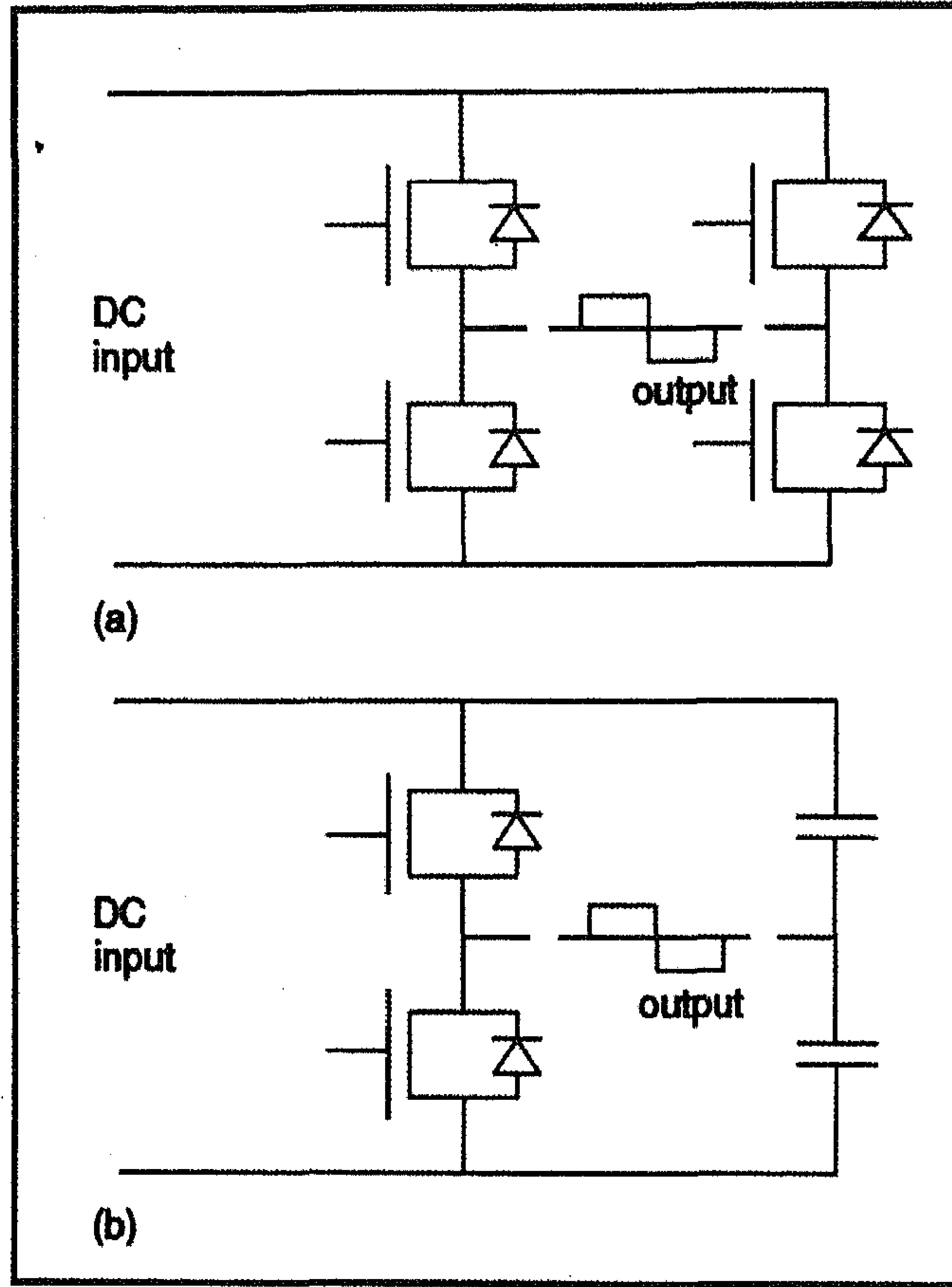
دائرة المقوم العكسي (**The Inverter Circuit**):

الشكل (10) يبين التخطيطات للمقومات العكسية ذات الموجة الكاملة ونصف الموجة. المفاتيح في قنطرة الموجة الكاملة (a) التبديل المتناوب إلى عكس الإدخال DC إلى إعطاء موجة إخراج مربعة بالقطع والوصل في تسلسل 1 و 4 و 2 و 3 (b). يمكن التحكم في اثنين (قنطرة نصف موجة) أو الأربعة (قنطرة موجة كاملة). تأثير السعة في قنطرة نصف الموجة على التوالي الإمداد يحد من أقل تردد خروج. جهد الإخراج لقنطرة الموجة الكاملة يكون ضعف قنطرة نصف الموجة لإمداد DC معطى. تقدير الجهد الكهربي لأجهزة القطع والوصل هو نفسه لكل من الموجة الكاملة ونصف الموجة على حد سواء، ولكن قنطرة النصف موجة لا تعمل عند الترددات المنخفضة ما لم تكن المكثفات كبيرة.



شكل (**10**): تخطيطات لدوائر المقوم العكسي

مفاتيح القطع والوصل لأشباه الموصلات المستخدمة في دوائر المقومات العكسية لقنطرة الموجة الكاملة وقنطرة نصف الموجة موضحة في الشكل (11). الاختيار يعتمد على تقييم أشباه الموصلات والتردد والدائرة المركبة.



شكل (11): المقومات العكسية لقنطرة الموجة الكاملة (a) وقنطرة نصف الموجة (b)

مقلادات أشباه الموصلات (Semiconductor Switches):

يسرد الجدول (1) الحد الأقصى للتيارات وترددات أشباه الموصلات المستخدمة في المقومات العكسية. مع الثايرستورات يمكن التحكم في التيارات العالية جدًا، ومع ذلك،

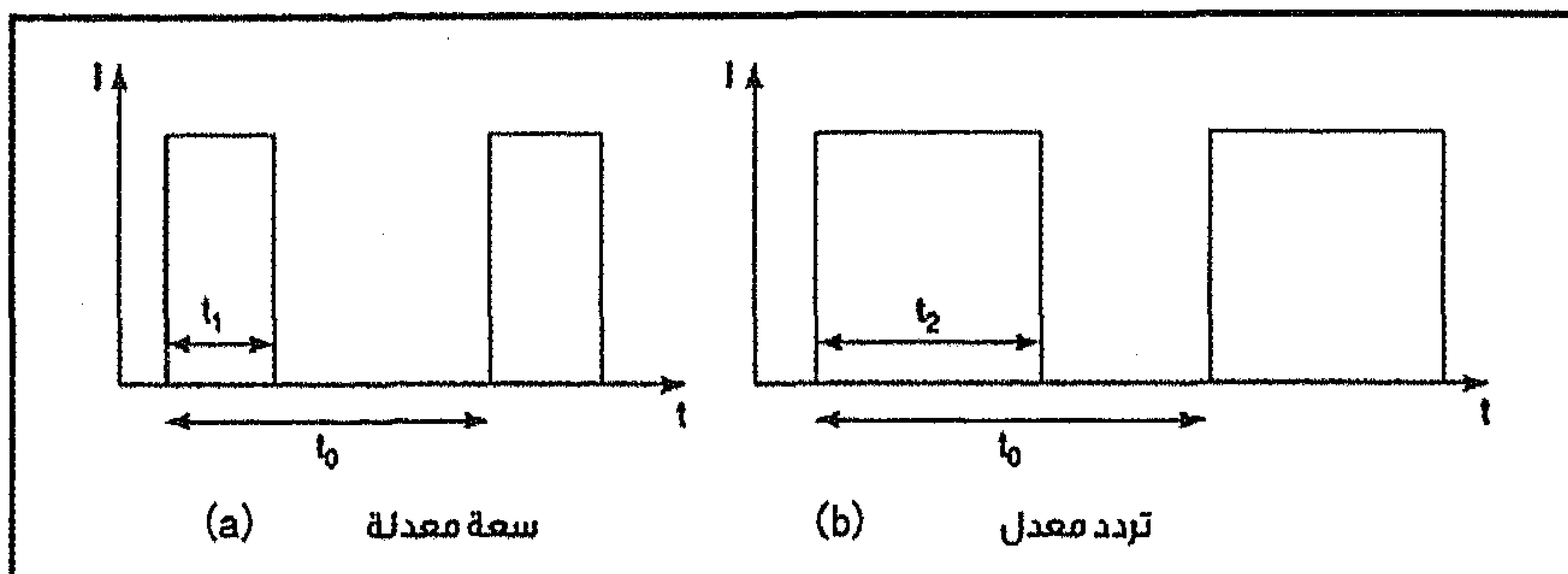
الجهد عبر الثايرستور (مقلاد إلكتروني ترانزستوري) ينخفض إلى الصفر لإيقاف تشغيله (استبدال)، الذي يستغرق حوالي 20 ميكروثانية وتحد من ترددات تشغيلها إلى حوالي 20 كيلوهرتز. بوابة الترانزستورات ثنائي القطب المعزولة (IGBTs) وترانزستور المفعول المجالي شبه موصل معدني أكسيدي (أحادي القطب) (MOSFET) يسمح بالحصول على مرات القطع والوصل بشكل أسرع. IGBTs يمكن أن تعمل عند حوالي 80 كيلوهرتز وتحمل تيارا شدته 200 أمبير وفولطيات تصل إلى 3 كيلوفولت. يتم الحصول على ترددات تشغيل أعلى باستخدام MOSFET، التي يمكن أن تعمل لتصل إلى 1 ميجاهرتز، 1 كيلو فولت و 150 أمبير.

جدول (1): القيمة العظمى للترددات والتيارات في أشباه الموصلات المستخدمة في المقومات العاكسة

Device	Voltage (kV)	Current (A)	Frequency
Thyristor	5	3000	500 Hz
IGBT	3	500	80 kHz
MOSFET	1	150	1 MHz

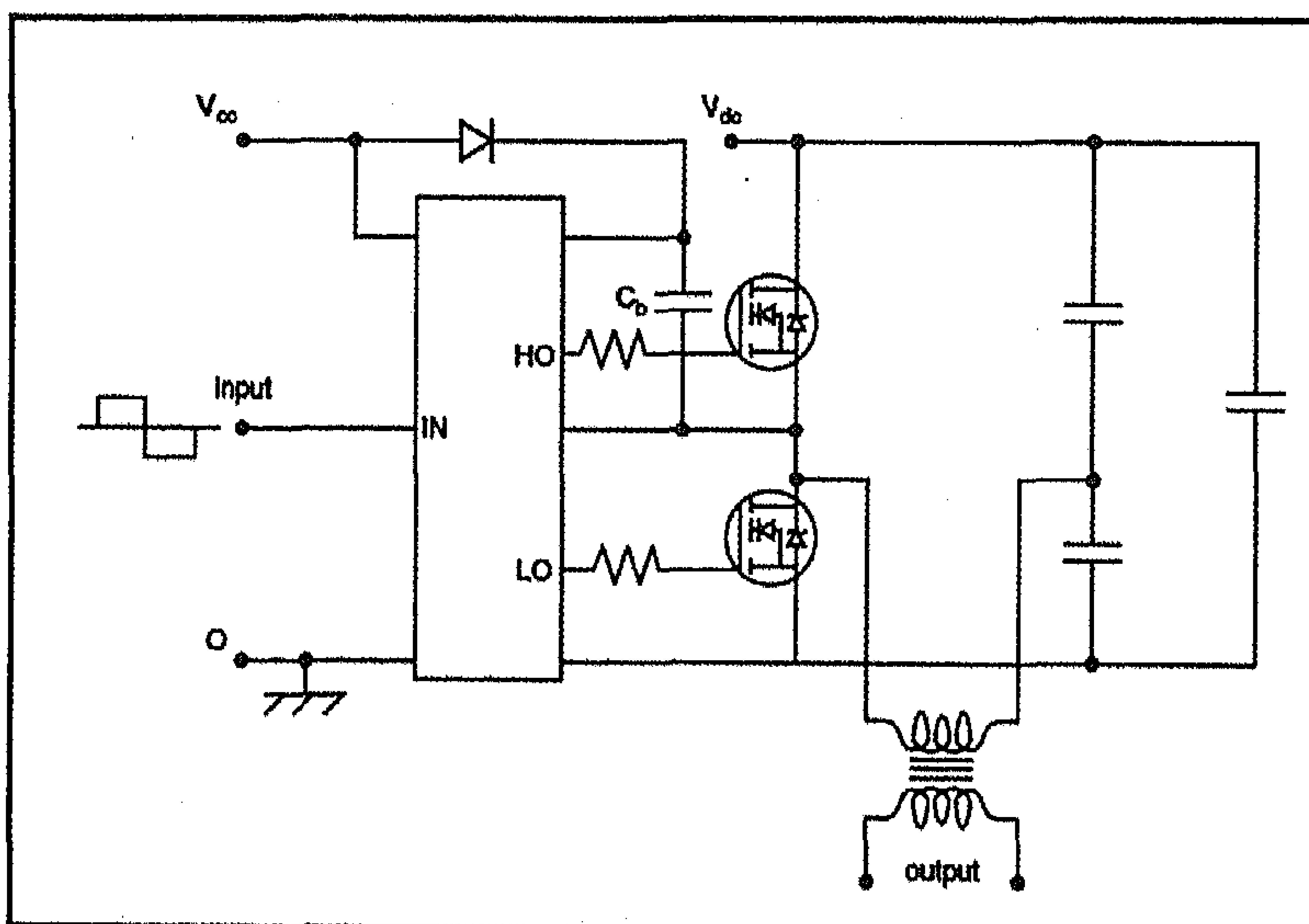
التحكم في التيار (Current Control):

مخرجات التيار المقابلة لسعة النبضة ومراقبة التردد موضحة في الشكل (12). من الممكن الحصول على مخرج للتيار المتناوب AC أو مخرج التيار الثابت DC أحادي الاتجاه. الجهد الناتج من العاكس يتناسب مع النسبة ما بين زمن الوصل وزمن الدورة (t_0). يمكن استخدام عدد من الاستراتيجيات المختلفة للتحكم في ناتج التيار والقدرة، بما في ذلك: (1) تعديل عرض الذبذبة التي يكون فيها زمن الدورة ثابتا والناتج يكون سلسلة من النبضات بنسب متغيرة (الشكل 12a)، (2) تعديل معدل النبضة التي يكون فيها طول النبضة ثابتا ولكن التردد مختلف.



شكل (12): تعديل السعة والتردد لمخرج المقوم العاكس

الشكل (13) يبين دائرة تحكم نصف القنطرة المستخدمة كأساس للعديد من إمدادات البلازما المختلفة. اثنان من MOSFETs أو IGBTs يتم تبديلهما بالتناوب عند تردد تكرار النبضة وضعتها إشارة مناسبة في الإدخال. من الضروري عدم تشغيل اثنين من MOSFETs معا حتى بالنسبة لوقت قصير جدًّا. مكثف C_b في دائرة التحكم يكون قادرًا على قيادة MOSFET العلوي بشكل صحيح. اثنان من المكثفات الفعالة المتصلة على التوالي تؤسس الإخراج عند نصف جهد الإمداد DC.



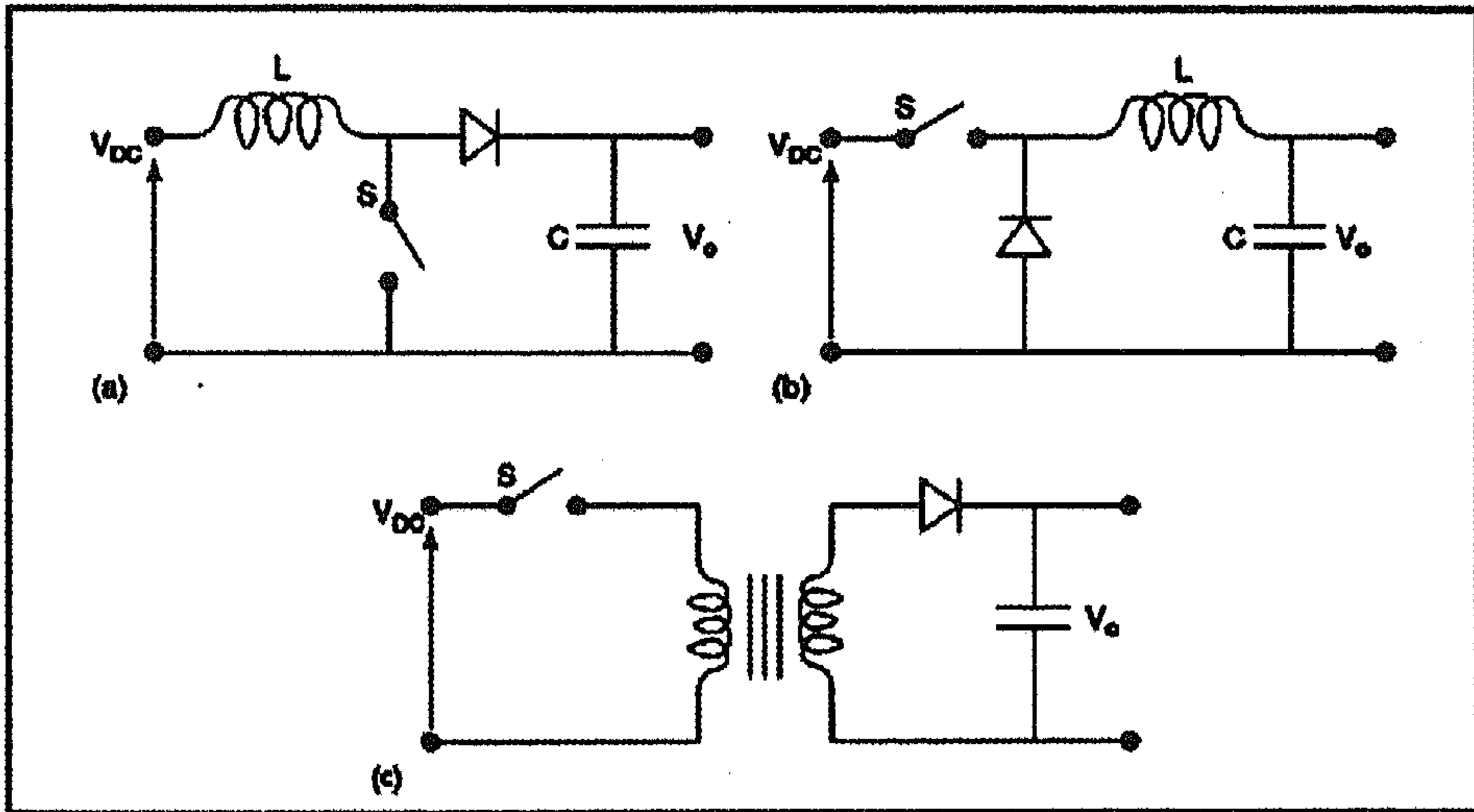
شكل (13): قنطرة نصف موجة للمقوم العاكس باستخدام MOSFETs

دارات المحول (Converter Circuits):

تتميز دارات المحول بالبساطة وعدد صغير من المكونات والقدرة على تغيير الفولطيات DC دون محول. تستخدم دوائر التعزيز والارتداد لتخطو بالفولطيات صعودا وهبوطًا كبديل للمحولات عندما تكون نسبة المحول مرتفعة. وترد أمثلة لدوائر إمدادات التعزيز ومحول الارتداد في الشكل (14). عندما يكون المفتاح S مغلقًا، يسري التيار في المحث (a) وتختزن الطاقة. إذا بعد الزمن t المفتاح S مفتوح، يتم تفريغ المحث خلال مقوم وتنمو الطاقة المختزنة في المكثف. بعد بضع دورات، يتحقق شرط التوازن عندما تتساوى الطاقة المختزنة في المكثف بالطاقة المختزنة في المحث. المحولات تخزن الطاقة في المحث ليزداد (boost) أو ينقص (buck) جهد الإمداد.

جهد الخرج دالة في نسبة اللفات وتعطى بالمعادلة:

$$V_{out} = V\left(\frac{T}{T-t}\right)\left(\frac{N_2}{N_1}\right)$$



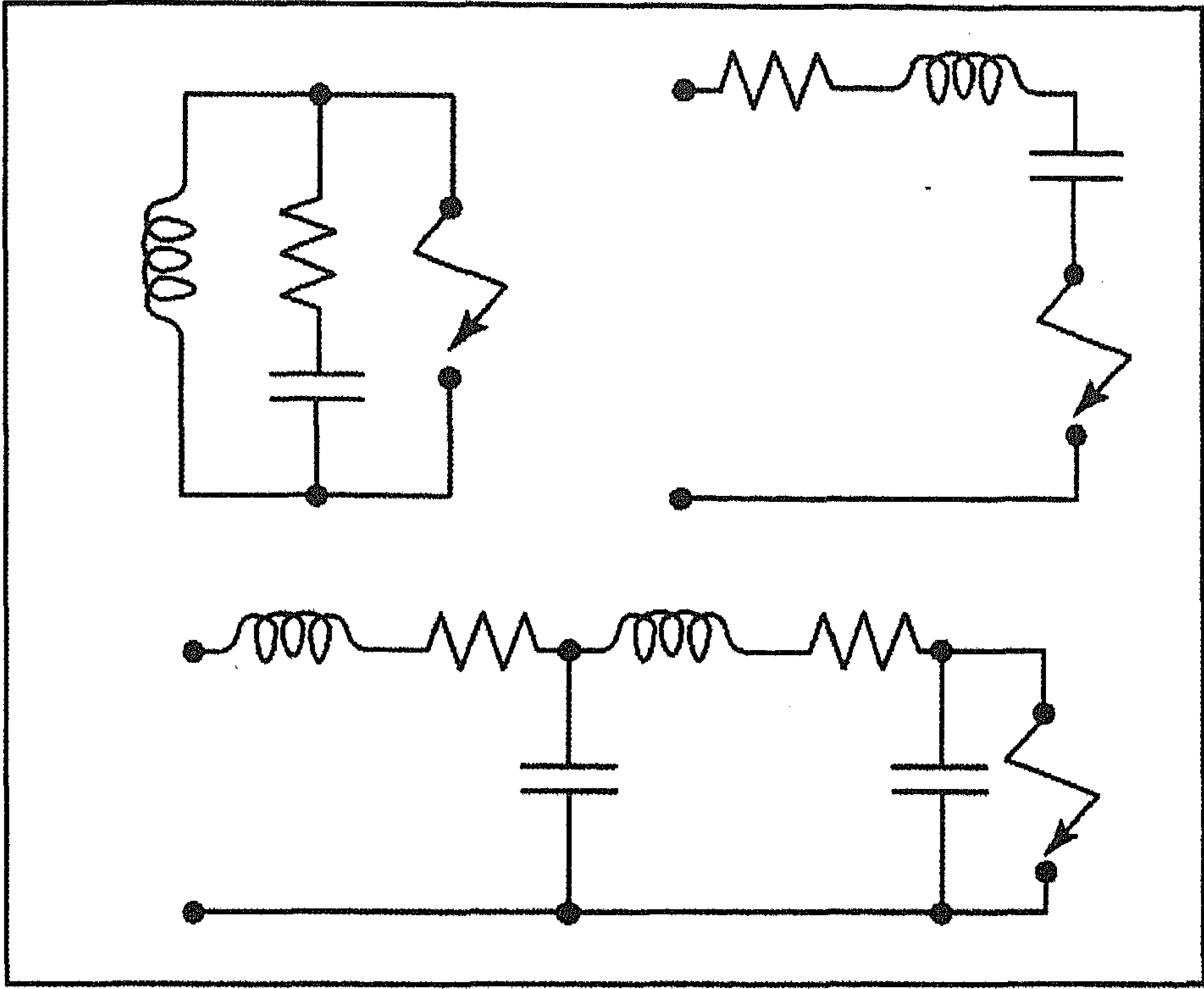
شكل (14): دارات المحول

الرنين:

بالإضافة إلى المحاثّة والمكاثفة المتصلة عمدًا في دوائر التفريغ، توجد المكاثفة الذاتية بين لفات المحارض والمحاثّة الذاتية للمكثفات، والأربطة البينية، والأقطاب، والـمُوصّلات المتاخمة، وصليّة النبض المغناطيسي (الفيض المتبادل) بين الـمُوصّلات الناقلة للتيار والمفاعلة التسرُّبيَّة للمحولات.

أمثلة ذلك دوائر الرنين المتصلة على التوالي والتوازي وخط النقل أو كابل التوصيل. موضحة بالشكل (15). المحرض والمكثفات ترد كعناصر منفصلة ولكن قد تكون موزعة على طول الموصلات في الدائرة وتشمل مكثفا أو محرضا طفيليا وتسلك مسلك خطوط الانتقال عند الترددات العالية:

$$\upsilon = iR + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int idt$$



شكل (15): مصادر الرنين في دارات إمدادات البلازما

معادلة الرنين المتصلة على التوازي تكون مماثلة.

معادلة الرنين على التوالي والتـوازي لهـا حلـول تخميـد نـاقص (underdamped) أي تذبذبية عندما يتحقق الشرط:

$$R < 2\sqrt{L/C}$$

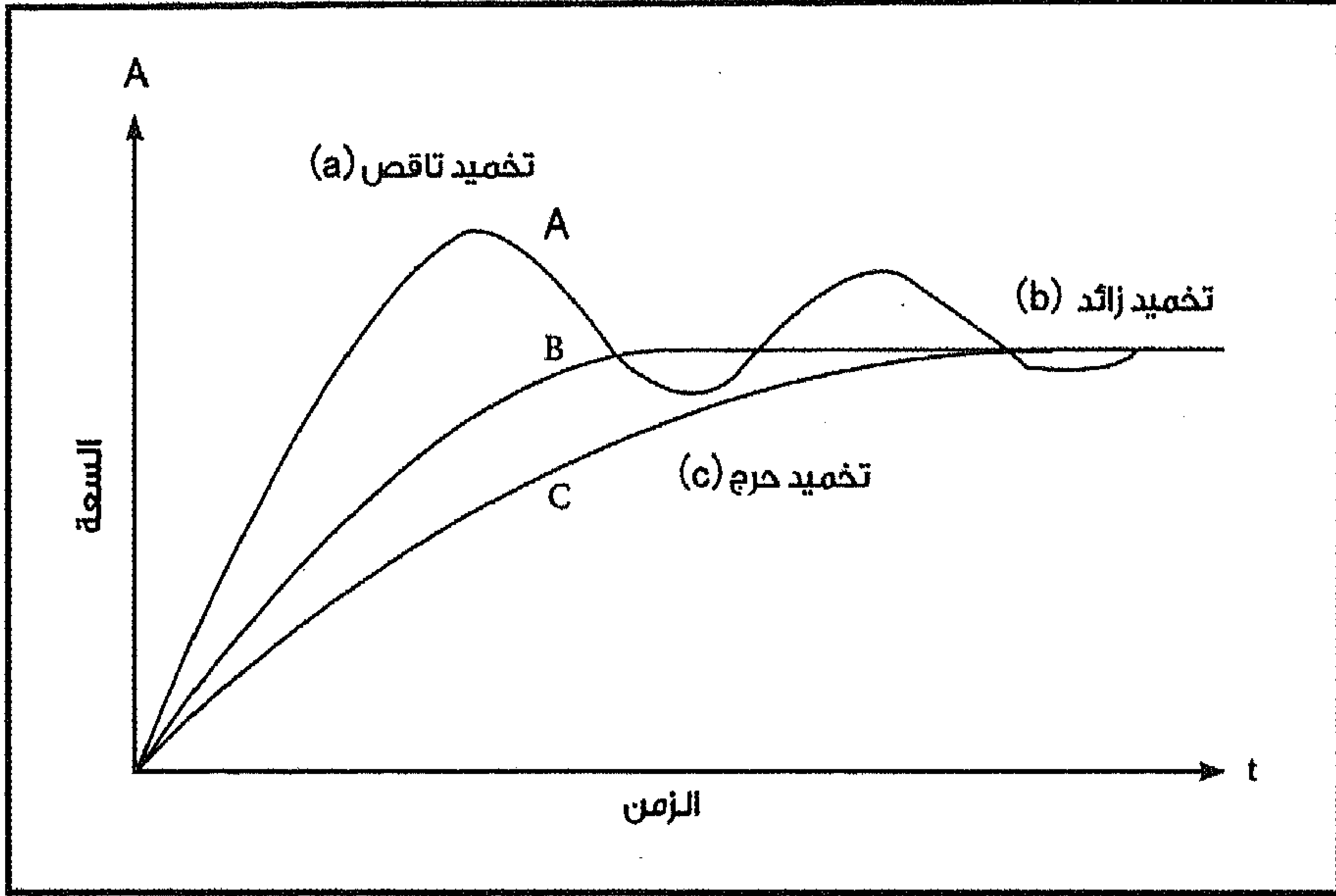
وتكون تخميدًا حرجًا (critically damped) بشرط:

$$R = 2\sqrt{L/C}$$

أو تخميدًا زائدًا (overdamped) عندما يتحقق الشرط:

$$R \geq 2\sqrt{L/C}$$

والشكل (16) يوضح شروط الرنين الثلاثة:



شكل (16): شروط الرنين

تردد دائرة الرنين المتصلة على التوالي يعطى بالعلاقة:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

قمة جهد الخروج عند حدوث الرنين يصبح $Q\hat{v}$ حيث $\hat{v}$ قمة الجهد التذبـذبي، ومقـدار عامل التكبير Q لجهد التغذية يعطى بالعلاقة:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR}$$

الفصل التاسع

البلازما الباردة في الطب والبيئة

مقدمة:

البلازما عديمة التوازن هي وسيلة محدودة. تحتوي على أنواع من الجسيمات المشحونة النشطة مع درجات الحرارة 30000 كلفن وأعلى، التي تتعايش مع الغاز المحايد، ذات درجة حرارة منخفضة جدا بالمقارنة بتلك الجسيمات النشطة، تقريبا بنفس درجة حرارة الغرفة أو في الغالب مئات قليلة من الدرجات. عادة يتم إشعال البلازما بتطبيق جهد كهربي لغاز، حيث تكتسب الإلكترونات والأيونات الطاقة من المجال الكهربي مباشرة. هذه الطاقة تبدد في تصادمات مرنة أو غير مرنة مع الجسيمات المحايدة، وتنقل الحرارة إلى الخارج إما بالإشعاع أو الانتقال. بدعم فرق درجات الحرارة الهائلة بين أنواع الجسيمات المشحونة والمحايدة يتطلب طريقة محددة لتشغيل البلازما، حيث إنه يعيق نقل الطاقة بين الجسيمات النشطة والغاز المحيط. ويتحقق هذا الوضع بسهولة عند ضغط منخفض ؛ لأن التصادمات في الوسط المخلخل شحيحة.

التفريغ ذو الضغط المنخفض (0.0001 – 0.01 ضغط جوي) له أهمية كبرى في تكنولوجيا الإضاءة وفي تجهيز الأسطح الصلبة (الطلاء، والنمشية، والتنظيف، والتنشيط). استثنائية نشاطها الكيميائي تسمح تقريبا بتعديل أي سطح، على الرغم من انخفاض درجة حرارة خلفيتها التي تجعلها مناسبة لمعالجة الأسطح الحساسة للحرارة. وقد أصبحت المعالجة السطحية تقنية راسخة من أجل تكنولوجيا الطب الحيوي. أيضا سهلت تكنولوجيا البلازما إعداد ضمادات الجروح التي تساعد في تضميد الجروح

المزمنة. البلازما عديمة التوازن لديها إمكانيات كبيرة أخرى مثل إزالة التلوث الجرثومي للهواء والمعدات الطبية/ الجراحية.

يزداد معالج البلازما الباردة (غير متوازنة وتعمل عند الضغط الجوي) استخداما في أحدث الاتجاهات الطبية وغير الطبية؛ لأنها تحقق قدرا أكبر من المرونة في معالجة العينة (عادة) بإجراءات أسرع، بالإضافة إلى أنها اقتصادية؛ لأن تكلفة معدات التفريغ غير مطلوبة. قد استثمر الكثير من الجهد في تطوير مصادر مناسبة البلازما، التي لها خصائص مشابهة لتفريغ الضغط المنخفض من حيث ارتفاع النشاط الكيميائي ودرجة الحرارة المنخفضة للغاز. في الوقت الحاضر، من الممكن تشغيل توهج مستقر عند الضغط الجوي بالطاقة المنخفضة، بالقرب من درجة الحرارة المحيطة. هذه التقنيات لتطبيقات البلازما أدت إلى أفكار مبتكرة في الطب الحيوي. هذا الاتجاه الجديد قد أدى إلى مزيد من التنقيح لأجهزة البلازما؛ لأن الاحتياجات للأغراض الطبية تتطلب جودة المصدر بشكل أكثر صرامة من ذي قبل.

معالجة العمليات والتفاعلات الحيوية مع غاز البلازما ليست معروفة تماما في العلوم الطبية. النفاث المتأين الساخن (تجلط بلازما الأرجون، أو جهاز APC)، الذي تطور من خلال الشركة ERBE-MED، يطبق بنجاح لتجلط الجروح بدون تلامس، والتقرحات وإزالة الأنسجة غير المحددة. الدور الرئيسي من البلازما في هذه التقنية هو إمداد الطاقة الحرارية (الحرارة) التي سوف تبدل وتجفف أنسجة النزيف. تلك النوعية من تكنولوجيا البلازما تحظى بشعبية خاصة في الإجراءات المستبطنة (مثل تخثر قرحة في الجهاز المعوي)، والعلاج من الجروح والإصابات في تجويف الفم والأنف، والكثير غيرها.

نهج آخر يتضمن التفريغ المخلق بنبضات كهربية قصيرة المسلط على سائل فسيولوجي: يتم تسخين المياه محليًّا بالتيار الكهربائي، ويحدث انهيار في البخار. هذا الإصدار نوعا ما أقل عدوانية من تجلط بلازما الأرجون. يمكن استخدام التفريغ النبضي في مجموعة متنوعة من الإجراءات الطبية، بما في ذلك جراحة العمود الفقري وحتى

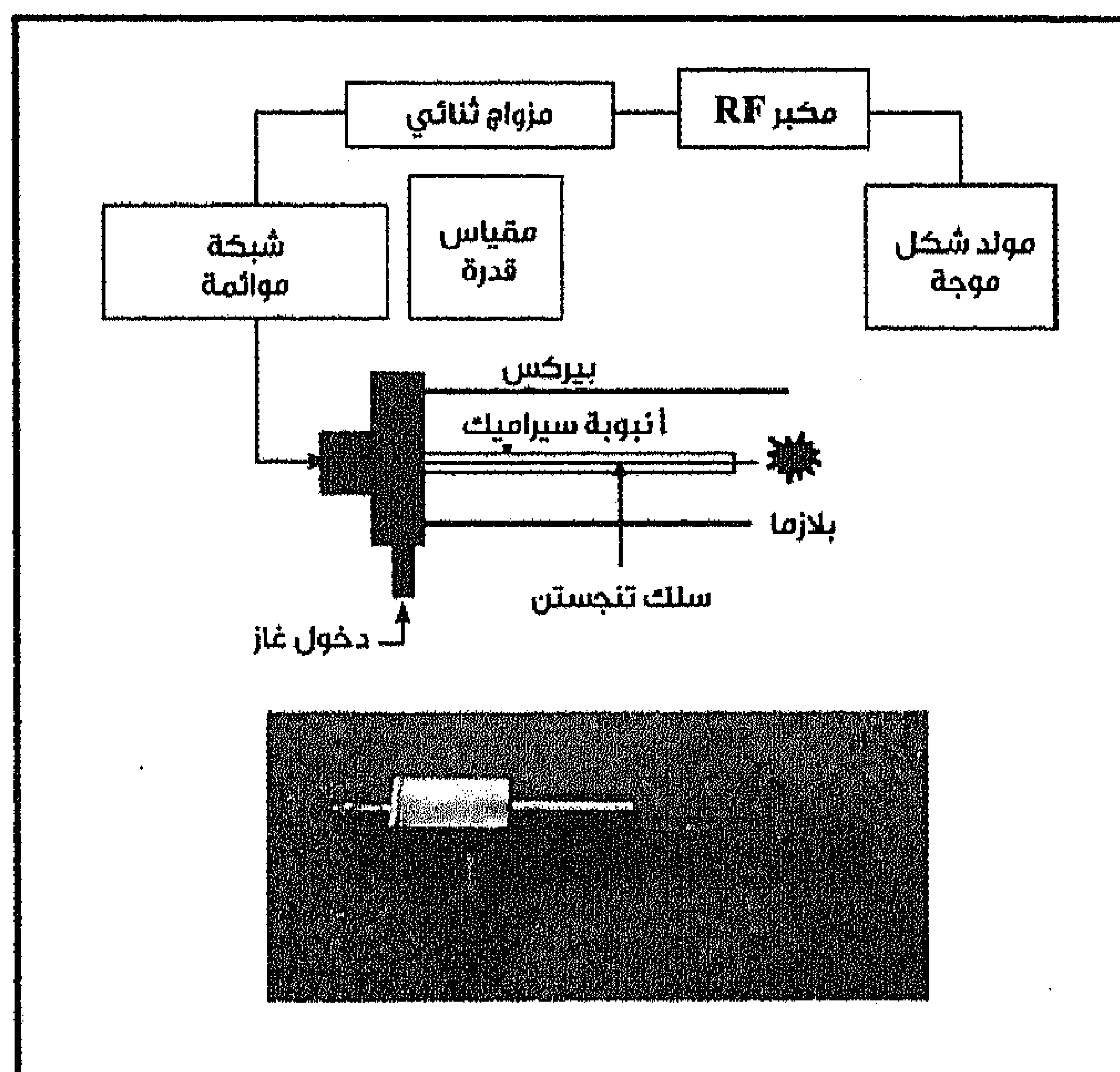
معالجة آفات القلب والأوعية الدموية. مؤخرا، عرض فريق الطب الحيوي في «جامعة آيندهوفن للتكنولوجيا» مفهوما آخر من استخدام البلازما في المعالجة الحيوية، الذي يجعل الأمر متعمدًا من خصائص البلازما هو عدم التوازن. والهدف ليس تبديل الأنسجة، لكنها تعمل تحت مشارف الضرر الحراري وحث استجابة محددة أو تعديلها. مصدر البلازما المناسب لمثل هذه التطبيقات ينبغي أن يعمل (يفضل) في درجة حرارة الجسم، ويعرض فقط النشاط الكيميائي المتواضع. الوصفة الأكثر وضوحًا للحصول على البلازما باردة هي أخذ العناية بتخفيض القدرة المتبددة (أو بالأحرى كثافة الطاقة). على سبيل المثال، كثافة طاقة بحوالي 10^4 - 10^5 W/m^3 ستؤدي عملها (بلازما الضغط المنخفض) في درجة حرارة غاز منخفضة. بلازما الضغط الجوي لا تعمل عادة في ظل هذه الظروف، ولكن من الممكن تصميم بعض التصميمات الخاصة. عند تصميم مصدر بلازما الضغط الجوي الباردة يستوجب التقليل إلى أدنى حد من قدرة الإدخال، مع تعظيم فقدان الطاقة للوسط المحيط. أنواع التفريغ التالية التي يمكن اعتبارها:

التفريغ بالترددات العالية (HF): عندما يكون تردد الإثارة أعلى من تردد أيون البلازما (عادة> 1 ميجا هرتز)، سوف يتم تسخين الإلكترونات فقط بمجال التردد العالي، بينما ستظل الأيونات باردة نسبيا. عدم كفاءة نقل الطاقة من الإلكترونات للجسيمات الثقيلة يكون استثنائيا، حيث يكون غاز التدفئة محدودا. وبالإضافة إلى ذلك، التفريغ بالتردد العالي (> 100 كيلوهرتز) ينصح باستخدامه للتطبيقات الطبية ؛ لأنها لم تكن تستحث اضطرابات كهربية في الجهاز العصبي أو تؤثر على وظيفة القلب.

التفريغ العابر: يمكن تشغيل البلازما باستخدام سلسلة من النبضات الكهربية القصيرة، حتى أن دورة العمل تبقى منخفضة. وعلاوة على ذلك، إذا كانت فترة بقاء النبضة الكهربية أقصر من 10^{-6} sec، ليس هناك ما يكفي من الوقت لتحويل الطاقة من الإلكترونات إلى ذرات الغاز/ الجزيئات. البلازما بنسبة السطح إلى الحجم كبيرة: في هذه الحالة فإن فقدان الطاقة بالتوصيل الحراري سوف يخفض درجة حرارة الغاز في حجم البلازما منخفضا. مثل هذه البلازما يمكن أن تتحقق في العديد من التطبيقات الهندسية:

البلازما الدقيقة بإبعاد حوالي 1 مم، تفريغ الألواح المستوية والمتوازية التي تفصلها مسافة (بضعة مم)، إلخ. البلازما الدقيقة تستهلك القليل جدًّا من الطاقة الكهربية، حيث تكون ملائمة وغير مكلفة. في الحالة الأخيرة (الألواح المتوازية)، غالبًا ما تغطى الأقطاب بطبقة عازلة (تعرف باسم تفريغ الحواجز العازلة). تشحن الطبقة العازلة أثناء تشغيل البلازما، ويقل المجال الكهربي والتيار في التفريغ.

البلازما المتدفقة: عندما يتم تطبيق تدفق الغاز خلال منطقة التفريغ، تبقى درجة الحرارة منخفضة بسبب التبريد بالحمل الحراري. وبطبيعة الحال، يمكن استخدام أية تركيبة من المبادئ المذكورة أعلاه. اختار فريق آيندهوفن ما يلي: ميكروبلازما تعمل بالموجات اللاسلكية (الترددات اللاسلكية) مع غاز التبريد. تم ابتكار جهاز البلازما الصغير (إبرة البلازما) من أجل المعالجة الحيوية. إبرة البلازما هي التفريغ الشبيه بنقطة، تتولد في رأس سلك معدني، يحاط بأنبوب بتدفق غاز منخفض. هذه الهندسية توفر مرونة استثنائية ودقة في علاج عينات بيولوجية. الشكل (1) يبين تركيب التجربة وصورة لجهاز إبرة البلازما.



الشكل (1): تركيب تجربة وصورة جهاز إبرة البلازما

طب البلازما:

طب البلازما هو حقل الطب المبتكر الذي يجمع بين فيزياء البلازما، وعلوم الحياة والطب الإكلينيكي لاستخدام البلازما الفيزيائية لتطبيقات علاجية. التجارب الأولية تؤكد أن البلازما يمكن أن تكون أداة فعالة في المطهرات في الجسم الحي دون التأثير على الأنسجة المحيطة بها. استنادا إلى البحوث الأساسية المتطورة على تفاعل البلازما مع الأنسجة، والتطبيقات العلاجية الأولى في التئام الجروح، سيتم استخدام البلازما في علاج الأمراض الجلدية وطب الأسنان. البلازما هي الحالة الرابعة من المادة، تشمل الجزيئات والذرات الفعالة والأيونات والإلكترونات، بالإضافة إلى أنها مصدر لفوتونات الأشعة فوق البنفسجية. هذه البلازما تولد أصنافا نشطة مفيدة للعديد من تطبيقات الطب الحيوي مثل تعقيم الأدوات الجراحية والأنسجة الحية المزروعة. التطبيقات الحساسة للبلازما، مثل تعريض جسم الإنسان أو الأعضاء الداخلية للعلاج ممكنة أيضا للأغراض الطبية.

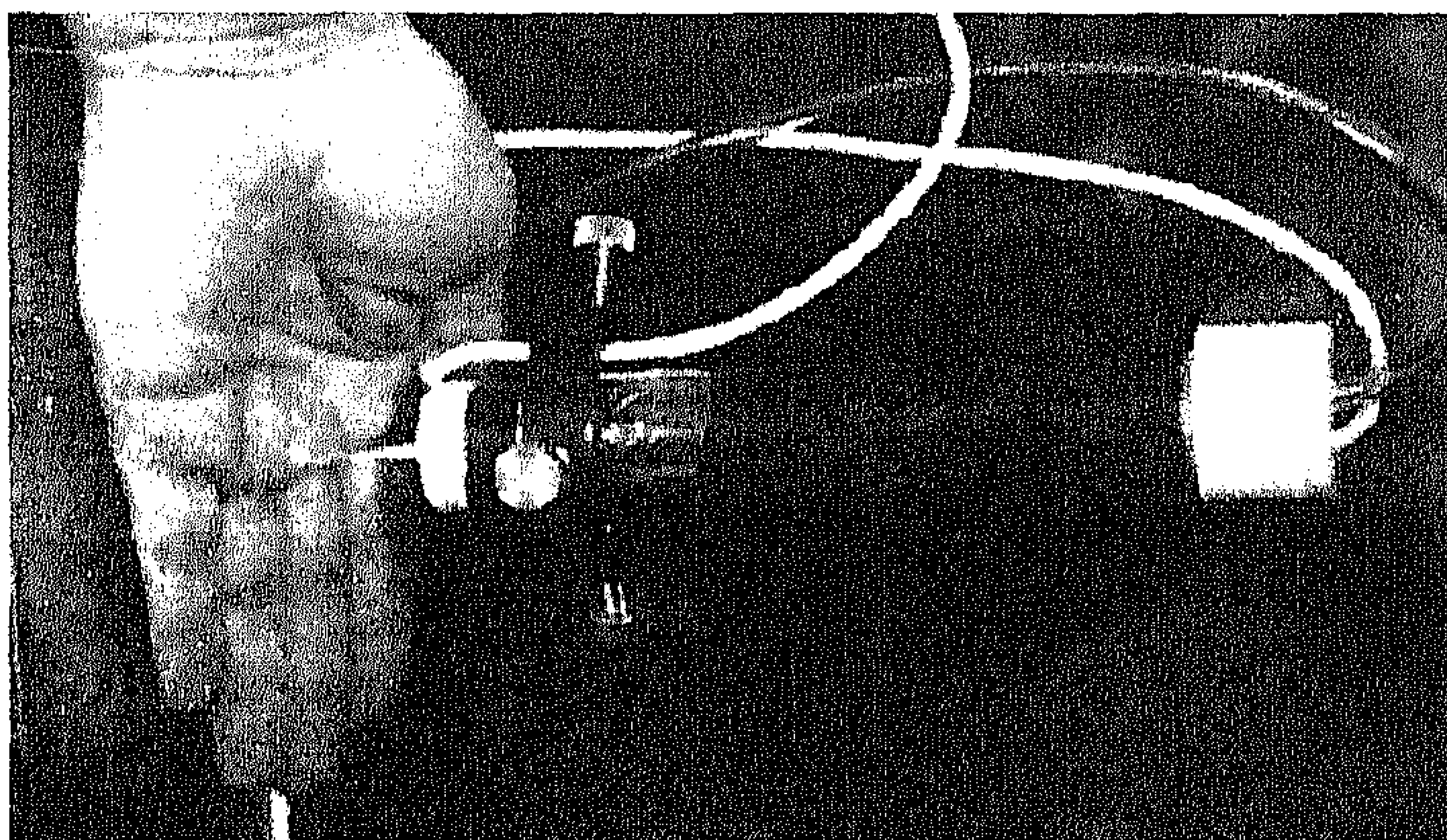
البلازما غير الحرارية تحت الضغط الجوي للعلاج الطبي:

في الآونة الأخيرة كان من أهم التحديات هي تطبيق البلازما غير الحرارية مباشرة على سطح جسم الإنسان أو على الأعضاء الداخلية. كما يمكن تعديل الأسطح وإزالة التلوث البيولوجي على حد سواء للبلازما المتولدة تحت الضغط المنخفض والضغط الجوي. فقط مصادر البلازما المتولدة تحت الضغط الجوي قابلة للتطبيق حيث يمكن استخدامها لتطبيقات علاجية مباشرة. وأحد مصادر البلازما التي يمكن تطبيقها على الجسم البشري تستند إلى مبدأ تفريغ حاجز العازل (DBD). جهاز DBD التقليدي يتألف من قطبين مستويين على الأقل، واحد منهما مغطى بمادة عازلة ويتم فصل الأقطاب بفجوة صغيرة تسمى فجوة التفريغ. ومع ذلك، لتطبيق أجهزة DBD في الأغراض الطبية، جسم الإنسان يمكن اعتباره أحد الأقطاب الكهربية وبالتالي القطب الآخر مغطى بمادة عازلة مثل الألو مينا أو الكوارتز. من أهم التطبيقات الطبية لجهاز DBD هو علاج الأمراض

الجلدية والجروح وعلاج الورم، والتطهير من سطح الجلد. ويمكن للبلازما الباردة ملامسة الجلد دون الإضرار به، مما يجعلها مثالية لتطهير الجروح (انظر الشكل 2).

والتفاعلية العالية للبلازما هي نتيجة مكونات البلازما المختلفة: الإشعاعات الكهرومغناطيسية (الأشعة فوق البنفسجية، الضوء المرئي، الأشعة تحت الحمراء، المجالات الكهرومغناطيسية عالية التردد، إلخ) من جهة، والأيونات والإلكترونات والأنواع الكيميائية المتفاعلة والشقوق الكيميائية من ناحية أخرى.

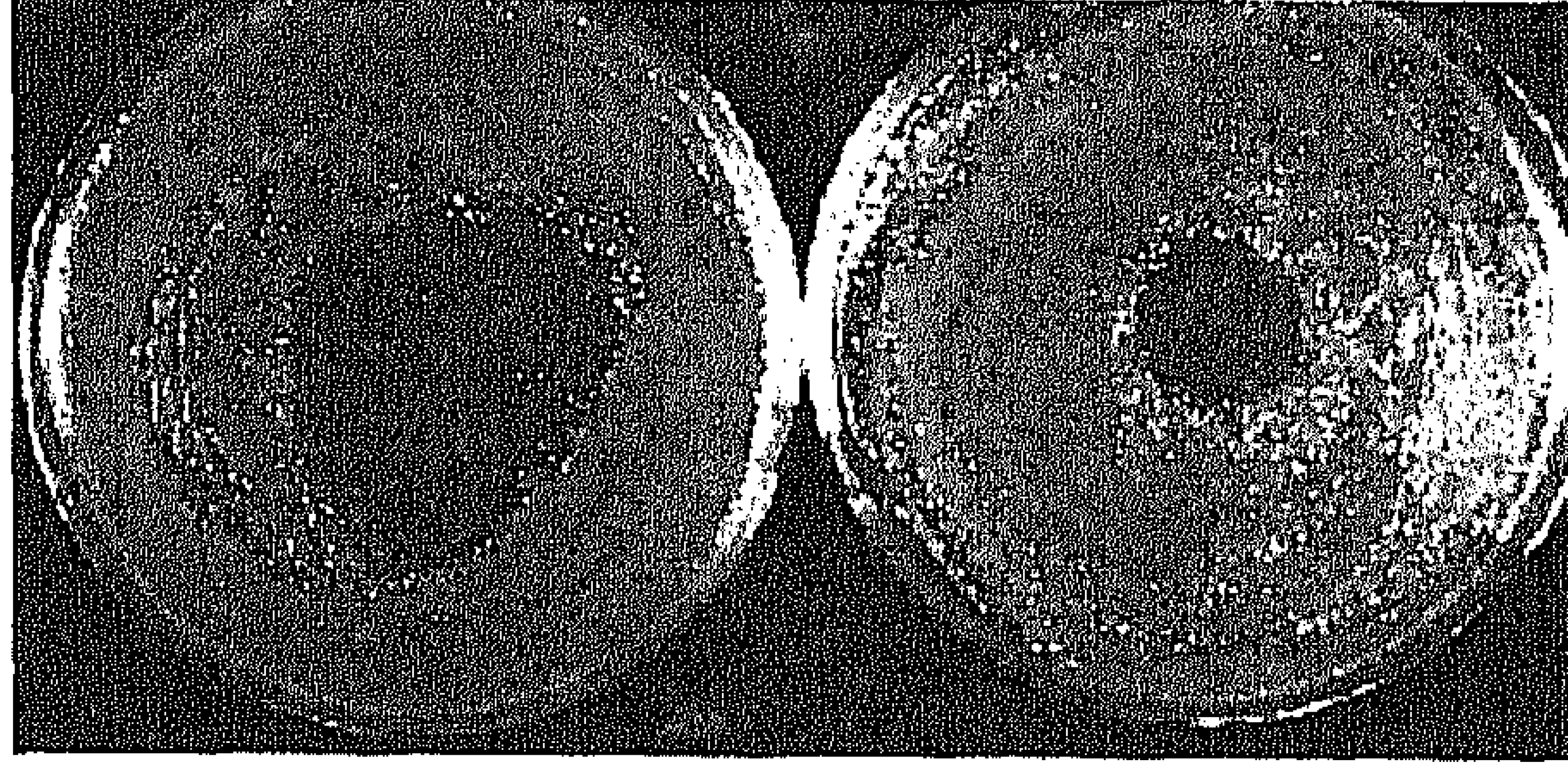
النهج الأول للطب العلاجي بالبلازما: الأمراض الجلدية والتئام الجروح. التجارب الأولية تؤكد أنه يمكن قتل العوامل المعدية دون ردود فعل سلبية على خلايا الجسم السليمة المحيطة. وعلاوة على ذلك، فمن الممكن تحفيز العمليات الفسيولوجية والبيوكيميائية في الأنسجة الحية عن طريق العلاج بالبلازما في ظل ظروف خاصة. وهذا يفتح الباب أمام إمكانية استخدام البلازما لدعم التئام الجروح وكذلك لعلاج العديد من الأمراض الجلدية. لذلك، يتم توجيه تطبيق البحوث لتطوير المفهوم المتكامل لعلاج الجروح بالبلازما التي تضم كلا من تنظيف الجروح السطحية والمطهرات وتحفيز ترميم الأنسجة في طبقات الأنسجة العميقة. على أساس علمي متين، يوجد المزيد من التطبيقات مثل البلازما العلاجية في طب الأسنان، أو الجراحة، وسيتم تطبيقها خلال السنوات القادمة.



الشكل (2): البلازما الباردة تلامس الجلد دون ضرر مما يجعلها مثالية لتطهير الجروح

البلازما في درجة حرارة تتراوح بين (المسألة في بداية التفريغ الكهربي) حار جدا (مسألة مختبر مكثف) وبارد جدا. البلازما الطبية تهتم بما فيه الكفاية لإنتاج أنواع رد الفعل اللازمة لمعالجة فعالة، ولكن باردة بما يكفي لمغادرة الأنسجة سالمة. في العقد الماضي، كُثِّفت البحوث بشأن استخدام البلازما في درجة حرارة منخفضة في الطب. وقد اكتشف الباحثون السبل لتطبيق البلازما مباشرة إلى الأنسجة الحية لإيقاف مسببات الأمراض؛ لوقف نزيف دون إتلاف الأنسجة السليمة؛ وتطهير الجروح وتسريع التئام الجروح؛ وقتل انتقائي لبعض أنواع الخلايا السرطانية. البلازما تنتج كيميائيا الذرات والجزيئات التفاعلية مثل الهيدروكسيل والأكسجين الذري الذي يمكن أن يقتل البكتيريا الضارة عن طريق الأكسدة. هذا أمر مهم لأن أكسدة الدهون والبروتينات التي تشكل غشاء الخلية يمكن أن تؤدي إلى تعطيل كامل للغشاء. اكتشف الباحثون أن البكتيريا لا يمكن أن تتعامل مع البيئة القاسية التي أوجدتها البلازما؛ تقتل البكتيريا بأعداد كبيرة في غضون دقائق أو حتى ثوان. لقد استغل العلماء هذه الخاصية من البلازما لتطوير أجهزة البلازما التي يمكن استخدامها لتعقيم الأدوات الطبية دون التعرض لخطر تعرضها للتلف. يتم تعقيم العديد من الأدوات الطبية الحديثة من البوليمرات الحساسة للحرارة بواسطة الوسائل التقليدية، مثل جهاز الأوتوكليف، الذي يستخدم ارتفاع ضغط البخار الساخن. استخدام أنواع البلازما التفاعلية قرب درجة حرارة الغرفة يمكن أن يقتل البكتيريا بسرعة والفيروسات والفطريات المودعة على أسطح الأدوات الجراحية والأجهزة الطبية، بما فيها تلك المصنوعة من البوليمرات الحساسة للحرارة. الخصائص الخاصة للبلازما الباردة تفتح آفاقا جديدة للحماية من العوامل المعدية بدرجة عالية مثل بريون، وهو بروتين شوه هيكليا وهو المسؤول عن مرض «جنون البقر»، والتي هي مقاومة لجميع إجراءات التطهير التجارية. ويبدو أن أنواعًا من البلازما التفاعلية تسبب ضررا قليلا أو مقبولة للتعايش لدى الأنسجة الحيوانية والنباتية، في حين أنها قادرة على تدمير الخلايا البكتيرية. وبناء على ذلك، تم العثور على خلايا جلد ليفية تكون قادرة على البقاء في ظل ظروف البلازما التي هي قاتلة خلايا كولاي (شكل3). هذه القدرة من البلازما الكافية لتدمير البكتيريا وترك الأنسجة الحيوانية والنباتية السليمة هي المفتاح

لتطوير تطبيقات البلازما الهامة، بما في ذلك إزالة التلوث الغذائي وتطهير الجلد، والحد من الورم.



شكل (3): يوضح تعرض أطباق بتري من الخلايا كولاي لمدة 120 ثانية إلى عمود البلازما الباردة (يسار -- الهليوم + أكسجين، واليمين -- الهليوم فقط). المناطق المظلمة في المركز «مناطق قتل»، حيث تم تدمير الخلايا البكتيرية دون مضاعفة

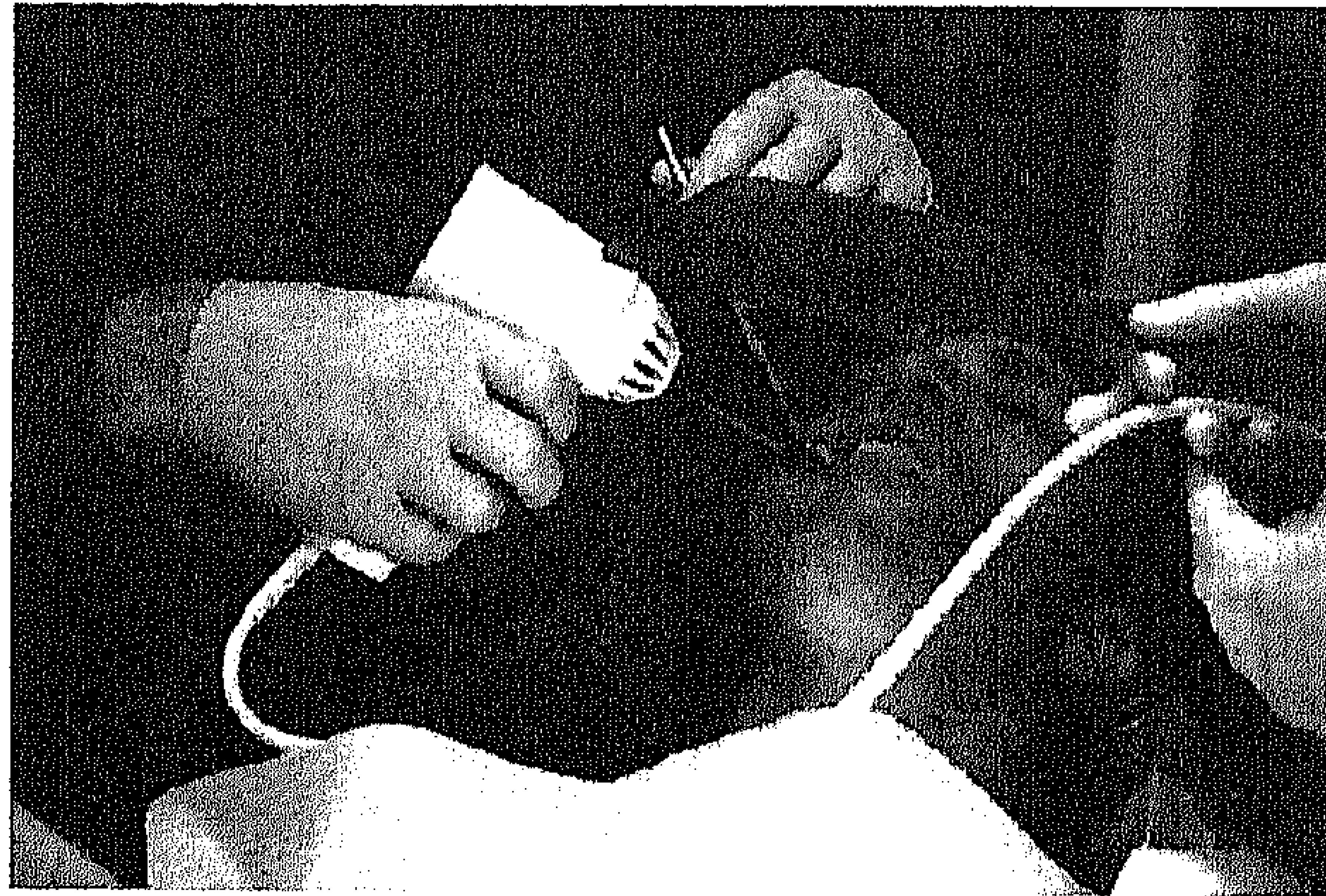
بالتشابه مع العلاج الكيميائي، العلاج بالبلازما الباردة يبدو أن لها القدرة على إحداث الموت المبرمج (موت الخلايا المبرمج) بين الخلايا السرطانية وكبح التكاثر السريع للخلايا السرطانية، ولكن بأقل ضرر للأنسجة البشرية الحية. في نهاية المطاف، فإن نجاح هذا النهج يعتمد على إيجاد وصفات صحيحة لأصناف البلازما المتفاعلة، وتحريرها بشكل فعال في بيئة معقدة من المواقع المريضة في الجسم البشري. هناك أمل في تطوير تطبيقات البلازما الباردة إلى حل بعض من هذه التحديات الطبية الملحة. بينما البلازما يمكن أن تدمر مسببات الأمراض بجرعات كافية، عند الجرعات المنخفضة يمكن أيضا أن تعجل من تكاثر الخلايا كخطوة هامة في عمليات شفاء الجروح.

قدرة البلازما لقتل خلايا البكتيريا وتسريع تكاثر خلايا الأنسجة السليمة، والمعروفة باسم عملية «البلازما القاتلة / شفاء البلازما»، وقد قاد العلماء التحقيق في استخدام البلازما الباردة لرعاية الجروح. الجروح المزمنة، مثل قرح مرض السكري التي لا تستجيب بشكل جيد لطرق العلاج التقليدية. عشرات الآلاف من حالات البتر تحدث كل عام في الولايات المتحدة بسبب الأساليب الطبية الحالية التي ليست لها القدرة على شفاء هذه الأنواع من الجروح. على الرغم من أن تكنولوجيا البلازما القائمة لرعاية

الجروح لاتـزال في مرحلـة البحـث والاختبـارات الأوليـة إلا أنهـا تظهـر علامـات مـن العلاجات الناجحة لبعض أنواع الجروح المزمنة.

البلازما وطب الأسنان:

تطور مثير آخر هو استخدام البلازما الباردة في طب الأسنان. وقد أظهرت الأبحاث الحديثة أن البلازما يمكن أن تكون فعالة للسيطرة على الأغشية الحيوية عن طريق الفم. في مختبر بيئة البلازما قد تبين إبطال نشاط البكتيريا التي تسبب تسوس الأسنان وأمراض اللثة. ويمكن إزالة الأنسجة المصابة في تجويف الأسنان باستخدام البلازما والاستعاضة عن مثقاب الأسنان الذي يخشاه الجميع. والتطورات الأخيرة لأبحاث البلازما تشير إلى أن أجهزة البلازما في المستقبل سوف تكون متاحة لأطباء الأسنان، والسماح لهم بعلاج الأمراض التي تنتقل عن طريق الفم على نحو فعال، مع الألم قليلا لمرضاهم (شكل 4). اعتمادًا على نتائج الدراسة، التي شملت عددًا من المتطوعين المصابين بنوعين رئيسيين من بكتيريا تسوس الأسنان، هما بكتيريا (Streptococcus mutans) و(Lactobacillus casei)، فإنه يكفي «رش» الأسنان المتسوسة بغاز البلازما، لمدة تتراوح بين 6 و18 ثانية، لإزالة البكتيريا والأنسجة المتسوسة معًا. كلما تعرض السن أكثر لهذا الغاز(المرشوش بواسطة رذاذ) تقلصت كثافة بكتيريا التسوس داخل السن إلى حد أبعد. في المستقبل القريب سنستطيع القول وداعًا لمثقب الأسنان والأوجاع والخوف من طبيب الأسنان.



شكل (4): يوضح استخدام البلازما في علاج تسوس الأسنان وأمراض اللثة

وبصفة عامة، يمكن تمييز البلازما إلى مجموعتين رئيسيتين: البلازما ذات درجة الحرارة العالية أو بلازما الانصهار وأخرى ذات درجات حرارة منخفضة أو التفريغ الكهربي للغازات. البلازما الحرارية تتضمن جميع الأنواع (الإلكترونات والأيونات والأنواع المحايدة) وتكون في حالة توازن حراري. أما البلازما ذات درجات الحرارة المنخفضة فيمكن أن تنقسم إلى بلازما حرارية وأيضا تعرف باسم البلازما شبه المحايدة والتي تكون في حالة اتزان حراري محلي (LTE)، والبلازما غير الحرارية (NTP)، أيضا تعرف باسم البلازما غير المتوازنة أو البلازما الباردة.

من ناحية أخرى، في البلازما الحرارية، فيض الطاقة من الإلكترونات للجسيمات الثقيلة يوازن فيض الطاقة من الجسيمات الثقيلة إلى البيئة فقط عندما تصبح درجة حرارة الجسيمات الثقيلة مساوية تقريبا لدرجة حرارة الإلكترون. بالطبع المصطلحات حرارية وغير حرارية والتوازن وعدم التوازن، ليست دقيقة جدا. بعض التطبيقات المبكرة للبلازما في الطب تعتمد أساسا على التأثير الحراري من البلازما للأنسجة، باستغلال الحرارة ودرجة الحرارة العالية في مجال الطب لفترة طويلة لغرض إزالة الأنسجة، والتعقيم والكي (وقف النزيف). في تخثر البلازما الأرجوانية (وتسمى أيضا تخثر الحزمة الأرجوانية) لتحل البلازما عالية التوصيل محل الوصلات المعدنية من أجل تمرير تيار خلال الأنسجة وتجنب صعوبات الالتصاق مع الأنسجة. أيضا البلازما الساخنة التي تستخدم لقطع الأنسجة، على الرغم من أن الآلية الدقيقة التي تحدث هذا القطع لا تزال غير واضحة. الحرارة التي تحررها البلازما تستخدم مؤخرا لتجميل إعادة هيكلة الأنسجة.

أكثر ما يميز الأبحاث الأخيرة حول تطبيقات البلازما في الطب هو استغلال التأثيرات غير الحرارية. التأثيرات غير الحرارية من البلازما واعدة جدا ومثيرة للاهتمام، والسبب الرئيسي هو أنه يمكن ضبطها لمختلف الأغراض الفرعية القاتلة مثل: التئام الجروح وانفصال الخلية، وغيرهما. وعلاوة على ذلك، يمكن للتأثيرات غير الحرارية أن

تكون انتقائية في تحقيق النتيجة المرجوة لبعض المادة الحية، في حين يوجد تأثير لا يذكر على الأنسجة المحيطة. هذا هو الحال، على سبيل المثال، بلازما تخثر الدم وتعطيل البكتيريا التي لا تسبب التسمم في الأنسجة الحية المحيطة.

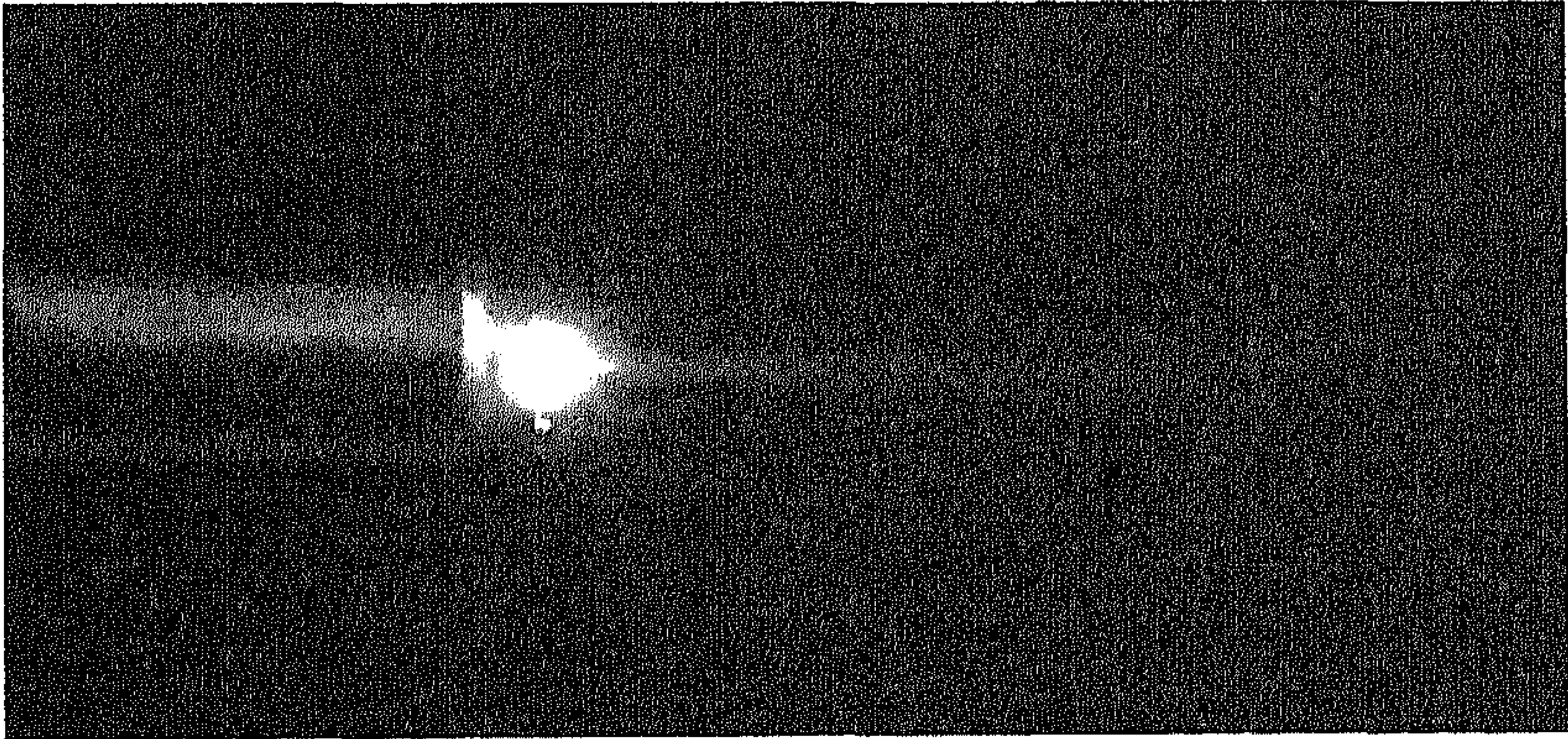
التطبيق المباشر للجهد العالي (10–40 كيلو فولت) لتفريغ البلازما غير الحرارية في الهواء في الضغط الجوي لعلاج الحيوانات الحية والناس يتطلب مستوى عاليا من احتياطيات السلامة. ضمان وسلامة الأنظمة غير المتضررة هي القضايا الحاسمة في طب البلازما. وينبغي أن يقتصر تيار التفريغ أدنى من القيم المسموح بها لمعالجة الأنسجة الحية. وعلاوة على ذلك، ينبغي أن يكون التفريغ نفسه متجانسا بما يكفي لتجنب الأضرار المحلية. خصوصية إنشاء التفريغ في الغلاف الجوي لحل هذه المشاكل بشكل فعال يمثل تحديا مهما لطب البلازما.

ومن المعروف أن البلازما هي الحالة الرابعة من المادة وتتشكل لإنتاج تدفقات من الإلكترونات عالية الطاقة عندما يتأين الغاز. بالفعل تستخدم البلازما الساخنة في عدد متزايد من التطبيقات التقنية والطبية لتطهير الأدوات الجراحية. أوضح الدكتور سفتلانا ايرموليڤا Svetlana Ermolaeva أن التطور الأخير في البلازما الباردة مع درجات الحرارة من 35–40 درجة مئوية يجعل التكنولوجيا خيارا جذابا لعلاج العدوى. البلازما الباردة قادرة على قتل البكتيريا الميكروبية الضارة دون أن تضر الأنسجة البشرية. والمهم هو أن البلازما قادرة على قتل البكتيريا في الجروح، وعلى الرغم من أن الأغشية الحيوية أكثر سمكا فإنها تظهر بعض المقاومة للعلاج. يمكن أن تمثل تكنولوجيا البلازما في نهاية المطاف أفضل بديل للمضادات الحيوية، وفقا لما قاله الدكتور Ermolaeva: «عملنا يدل على أن البلازما فعالة ضد البكتيريا المسببة للأمراض مع المقاومة للمضادات الحيوية المتعددة، ليس فقط في أطباق بتري ولكن في جروح المصابين الفعلية». وهناك ميزة أخرى للعلاج بالبلازما أنها غير مؤلمة، ولا تسهم في التلوث الكيميائي للبيئة.

التطبيقات الإكلينيكية للبلازما:

نظام البلازما النفاث يستخدم كمصدر طاقة جديدة تماما للاستخدام في العمليات الجراحية ويدخل كتقنية جديدة لجراحة البلازما. وتقنية جراحة البلازما لها فوائد إكلينيكية جديدة بحكم تأثيرها على الأنسجة. كتقنية جديدة في جراحة، هناك احتمال أن هذا النهج المبتكر هو الخلط بين واحدة أو أكثر من التقنيات الأكثر شيوعًا. وهكذا على سبيل المثال، تقوم التقنيات المستخدمة بالبلازما النفاث حيث تكون غالبًا مختلطة مع تلك التي تستخدم في مختر شعاع الأرجون أو جراحة الليزر. في الممارسة العملية، جهاز البلازما النفاث وآثاره الإكلينيكية تختلف كثيرا عن أي من هذه الأدوات الجراحية الحالية.

في نظام البلازما النفاث، التدفق المنخفض لغاز الأرجون يتركز في مساحة صغيرة داخل النفاث ويثار بجهد DC منخفض يطبق بين الأقطاب ثنائية القطب الداخلية. بلازما الأرجون الناتجة هي خليط من أيونات الأرجون ذات الطاقة العالية والإلكترونات التي تنبثق من طرف النفاث في مجرى دقيق (انظر الشكل 5). الخاصية الهامة لتدفق البلازما أنها تحتوي على عدد متساوٍ من الإلكترونات والأيونات الموجبة، بلازما النفاث الناتجة يكون متعادل كهربائيا. في هذا الصدد بلازما النفاث يختلف بوضوح عن جميع تقنيات الجراحة الكهربية ؛ لأنه في جراحة البلازما لا يوجد أي تيار كهربائي خارجي يتدفق إلى الأنسجة.



الشكل (5): نظام البلازما النفاث

بلازما الأرجون المنبعثة من النفاث قصيرة الأمد، وطاقة البلازما تتمثل في ثلاثة أشكال:

كالضوء – في الأجزاء المرئية وبالقرب من الأشعة فوق البنفسجية من الطيف، التي سيكون من المفيد أن تسهم في إضاءة مجال العمليات الجراحية، لكن ليست بالشدة الكافية لتسبب أضرارا أو الحاجة إلى وقاية العين، كالطاقة الحرارية- تكفي لتسخين الأنسجة بعمق محدود جدًّا وتسبب تخثر السطح؛ وفي صورة طاقة حركية لتنظيف أي سائل من على سطح الأنسجة ويمكن أن تستخدم أيضا لقطع الأنسجة. في معظم أنظمة البلازما النفاثة الضخمة تتدفق البلازما بسرعة تفوق سرعة الصوت بحيث تسمح للبلازما بالقطع خلال الأنسجة الصلبة مثل العظم.

عند وضع النفاث على مسافة حوالي 1 سم أو أكثر بعيدًا عن الأنسجة، يحدث تقلص وتخثر الأنسجة. أول ما يلاحظ عندما يتم تنشيط بلازما النفاث ويتحرك نحو سطح النسيج النازف هو أن أي سائل على سطح النسيج (الدم أو اللمفا) والتفتح أو النفخ بسرعة بعيدًا عن نقطة التطبيق للكشف عن سطح الأنسجة الجافة. بهذه الطريقة يكون النفاث قادرًا على العمل على السطح الرشح وفي إعداد تنظير البطن بغض النظر عن كمية النزيف. بلازما النفاث حقا فعالة إذا غمرت رأسها تماما في الأنسجة، عندما يتحرك النفاث (ذو الطاقة العالية) بالقرب من الأنسجة، البلازما تبخر سطح الأنسجة، وعندما يوضع بملامسة سطح النسيج سيؤدي إلى تقسيم الأنسجة. نظام البلازما النفاث قادر على قطع جميع الأنسجة، بما في ذلك العظام، مع تجلط سطوح القطع في آن واحد.

ويتحقق التخثر بتكوين سريع لطبقة رقيقة ومرنة لسداد سطح النسيج. اعتمادًا على مدة التطبيق إلى النسيج، سمك هذه الطبقة عادة 0.5 مم ولم تزد عن 2 مم لجميع الأنسجة. أقصى عمق لتأثير الأنسجة تم التوصل إليه في غضون 5 ثوان من التطبيق، وهذا العمق لا يزيد ماديا إذا ما تم تسليط البلازما على الأنسجة لفترة أطول. نظام البلازما النفاث غير مصمم من أجل سداد الأوعية الكبيرة. لتخثر أكثر فاعلية، رأس

النفاث يكون على بعد حوالي 1 سم أو أكثر من النسيج، وعند إعداد طاقة عالية (40 – 50). التحرك بالقرب من النسيج النازف أو استخدام إعداد الطاقة العالية سوف يبخر طبقة السداد؛ حيث الأسلوب المثالي هو العودة للخلف واستخدام الطاقة المتوسطة لتحقيق تأثير أمثل للتجلط. وبالفحص الدقيق لعلم الأنسجة بعد التعرض للبلازما تتكشف ثلاث مناطق للنسيج تتضمن طبقة رقيقة مرنة. على سطح النسيج هناك عادة ما تكون طبقة متفحمة رقيقة جدًّا (5–15 ميكرومترًا)، أسفل تلك الطبقة توجد طبقة إسفنجية متنخرة متوسطة تصل إلى 0.3 مم في العمق، وعمق أكثر تدمج طبقة نخرية ثالثة تصل إلى حوالي 1.6 مم في العمق.

لا توجد أية تأثيرات غير مرغوبة للبلازما على النسيج. هذه طريقة بسيطة وآمنة للقطع والتخثر حيث تختلف مع سائر التقنيات الجراحية الأخرى. في تخثر شعاع الأرجون والجراحة الكهربية، يتدفق تيار كهربائي من القطب الفعال عن طريق المريض إلى الأرض. وهذا يسبب تأثيرين إضافيين: تشكيل ثقوب صغيرة في سطح اللدغة التي يسببها الشرر والتي تسمح باستمرار النزيف، وفي هذه التقنيات اقتران المائع بالجراحة الكهربية اختراق لمنطقة الدمار يتحرك أعمق في الأنسجة إلى أعماق تصل إلى 14 مم على طول المسارات الأقل مقاومة مثل الأوعية الدموية.

التعقيم:

عند التعقيم بالهواء الجاف يجب استخدام درجات حرارة أعلى قد تصل إلى 160 درجة مئوية، وذلك بسبب مقدار الطاقة المنخفض في الهواء مقارنة بالبخار الرطب. فبينما يصاحب تكاثف البخار فوق سطح المعدات البارد أثناء التعقيم بالبخار الرطب بإطلاق مقدار ضخم من الطاقة خلال فترة قصيرة جدًّا في شكل طاقة مكثفة، يتم انتقال الحرارة أثناء التعقيم بالهواء الجاف عن طريق الحملان. قد يمكن تعجيل عملية التسخين عن طريق مراوح هوائية، ومع ذلك يتطلب التعقيم الفعال بالهواء الجاف فترات أطول (3 دقائق عند درجة حرارة 180 درجة مئوية). بالإضافة إلى ذلك، تتطلب عملية التعقيم

فترة توازن أكثر لكي تصل درجة الحرارة في جميع أجزاء الجسم الخاضع للتعقيم إلى الدرجة المطلوبة. لكن مع صعوبة إجراءات التحكم ومراقبة هذا الأسلوب وارتفاع نسبة الخطر أصبح تطبيق أسلوب التعقيم بالهواء الجاف محدودًا للغاية في المجال الطبي.

أساليب حديثة للتعقيم تحت درجات الحرارة المنخفضة:

أدى ابتكار مواد جديدة تستخدم في تصنيع المعدات الطبية الحديثة إلى تطوير وسائل تعقيم تتفوق على الأساليب التقليدية على الأخص بالنظر إلى العوامل التالية: - دورات العمل القصيرة - خالية من مرحلة الالتفاظ - خالية من الرواسب السامة - لا تتطلب إجراءات خاصة للتخلص من الغاز.

التعقيم بغاز بيروكسيد الهيدروجين والبلازما، يعتمد هذا الأسلوب على استخدام غاز بيروكسيد الهيدروجين تحت درجات حرارة تتراوح بين 45 و 55 درجة مئوية وتحت ضغط منخفض نسبيًّا يتراوح بين 8.0 و3.1 باسكال. كما يقوم مجال مغناطيسي عالي التردد بتوليد وسط من البلازما داخل حجرة التعقيم. تختم دورة التعقيم بعملية توازن الضغط أو تهوية تعمل على تحويل الجذريات الحرة (free radicals) وكذلك غاز بيروكسيد الهيدروجين إلى ماء وأكسجين، وبالتالي يمكن الحصول فورًا على المعدات المعقمة واستخدامها في الإجراءات الطبية. يعتمد منهج التعقيم على الجذريات الحرة في البلازما وعلى الأشعة فوق البنفسجية التي تصدرها البلازما. بالإضافة إلى درجات الحرارة المنخفضة التي تستخدم في هذا الأسلوب، يتميز التعقيم بغاز بيروكسيد الهيدروجين بأن نسبة الرطوبة في خليط الغاز لا تتعدى 5٪ وبالتالي يلائم تعقيم المواد التي تتأثر بالرطوبة. يعمل الأسلوب الذي طور حديثًا على زيادة نسبة تركيز محلول بيروكسيد الهيدروجين من 59٪ إلى 85 وحتى 95٪.

التعقيم بأبخرة غاز بيروكسيد الهيدروجين:

يتم التعقيم هنا ببخار غاز بيروكسيد الهيدروجين المضغوط تحت درجات حرارة منخفضة (درجة حرارة الدورة 50 درجة مئوية) دون تكوين البلازما. ومثل أسلوب

التعقيم بغاز بيروكسيد الهيدروجين والبلازما يصاحب تطبيق هذا الأسلوب عدة قيود خاصة بالمعدات ذات جوف ضيق (مثلًا الفولاذ 2 × 250 مم أو 3 × 400 مم). أما فيما يتعلق بامتصاص غاز بيروكسيد الهيدروجين وتأثيره على مواد التغليف، فتنطبق هنا نفس القيود سابقة الذكر.

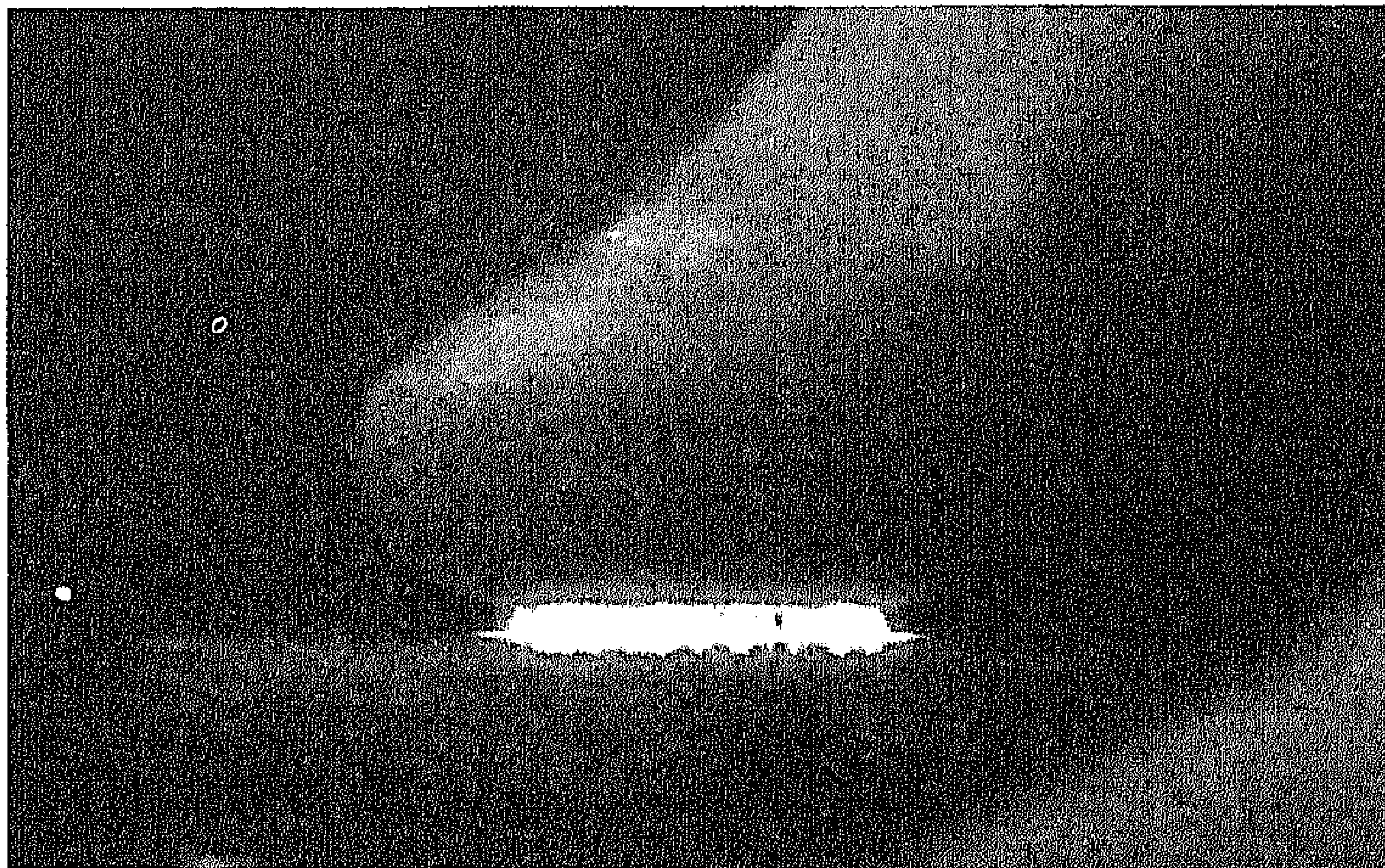
تعقيم الأنسجة الحية الحيوانية والبشرية:

معالجة البلازما مباشرة يعني أن تستخدم الأنسجة الحية نفسها باعتبارها أحد الأقطاب الكهربائية، وتشارك مباشرة في عمليات التفريغ الكهربي وتفعيل البلازما. هكذا يوضح الشكل (6) مباشرة العلاج بالبلازما (التعقيم) من جلد فأر حي. يتم تفريغ حاجز العازل (DBD) البلازما في هذه الحالة بين قطب الجهد العالي المغطى سطحه بالكوارتز والفأر الذي هو بمثابة القطب الثاني.



شكل (6): يوضح استخدام بلازما DBD لعلاج الأنسجة الحية

فريدمان وآخرون قاموا بتطوير جهاز DBD خصيصا لهذا الغرض حيث يتصل أحد الأقطاب بمصدر الطاقة ومعزول للحماية، والقطب الثاني هو جلد الإنسان أو الحيوان. بدون جلد الإنسان أو الحيوان أو أنسجة التفريغ لجهاز البلازما لا يشتعل. بمجرد أن يكون التفريغ الجوي أمنا يمكن تطبيقه مباشرة لجسم الإنسان كما هو موضح بالشكل (7).



الشكل (7): تطبيق **DBD** مباشرة لجسم الإنسان

عمليات البلازما:

تم تطوير عمليات البلازما لتحقيق مجموعة متنوعة من خصائص سطح معين. وهذه بعض الأمثلة:

تنظيف الأسطح:

معالجة البلازما بالأكسجين تكون آمنة وصديقة للبيئة وبديلة لطرق التنظيف التقليدية. تشكيلة واسعة من الصناعات تستخدم معالج البلازما الغازية لإزالة تلوث السطح العضوي من المواد التي تتطلب تنظيفا حرجا. الأنواع النشطة في الأكسجين جنبا

إلى جنب مع طاقة الأشعة فوق البنفسجية يخلق التفاعل الكيميائي مع الملوثات السطحية، مما يؤدي إلى تطايرها وإزالتها من غرفة التفاعل. والتطبيقات تشمل تنظيف لوحات الدوائر لتحسين روابط الأسلاك، وإزالة التلوث العضوي من الشرائح الزجاجية والشاشات المسطحة، وتنظيف الأجهزة الطبية وغيرها من المواد مثل المعادن وأنواع السيراميك المختلفة.

تعزيز الالتصاق:

تحسين الالتصاق بين سطحين هو تطبيق شائع. الالتصاق الجيد يتطلب قوى بينية قوية عبر التوافق الكيميائي و / أو الروابط الكيميائية. يمكن معالجة البلازما للأسطح حيث تساعد أيضا في إنشاء مجموعات توظيفية نشطة كيميائيا، مثل الأمينات، والكربونيل، ومجموعات الهيدروكسيل والكربوكسيل، لتحسين الالتصاق البيني. وتشمل التطبيقات الشائعة للمعالجة الأولية للقسطرة الطبية والدعامات القلبية الوعائية، ومكونات الحاقن، وأجزاء مضخة الغسيل الكلوي. كما يستخدم البلازما لتحسين قدرة الترابط على الطبقات التحتية مثل البوليمرات، والسيراميك والزجاج والمعادن المختلفة.

التخلص من المواد السامة الملوثة للبيئة:

تستخدم البلازما حاليا في العديد من الدول المتقدمة في التخلص من المواد السامة الملوثة للبيئة معتمدين على العمليات الكيميائية الفريدة التي تتم داخل البلازما. حيث يمكن أن تقوم البلازما بتحويل المواد السامة المنبعثة من مداخن المصانع ومن عوادم السيارات مثل غاز أكسيد الكبريت (SO) وأكسيد النيتريك (NO) إلى مواد غير سامة. فعلى سبيل المثال غاز NO قبل أن يخرج من المدخنة إلى الغلاف الجوي، توجه إليه حزمة من الإلكترونات ذات طاقة عالية من جهاز مثبت في منتصف المدخنة تعمل على تأين الغازات الموجودة (المادة السامة NO والهواء) أي تحولها إلى حالة بلازما. وقبل خروجها

إلى الجو تكون مرحلة التأين قد انتهت وتتكون جزيئات النيتروجين والأكسجين نتيجة لعملية إعادة الاتحاد. وبهذا نكون قد حولنا الغازات الملوثة إلى غازات نافعة بتكاليف أقل.

يجدر الإشارة هنا إلى أنه تم حديثا التوجه إلى معالجة الغازات المنطلقة من عوادم السيارات، حيث تم تركيب جهاز بلازما في عادم السيارة ليعالج الغازات السامة قبل خروجها إلى الجو. كذلك أجريت تجارب عديدة على الفضلات الصلبة والسائلة حيث تستخدم بلازما عند درجات حرارة عالية تصل إلى 6000 درجة مئوية تعمل على تبخير وتحطيم المواد السامة وتحولها إلى غازات غير سامة، وفي نهاية العملية يكون ما تبقى من مواد صلبة في صورة زجاج. وتم في أمريكا العام الماضي التخلص من حوالي 4000 مستودع يحتوي على فضلات صلبة وملوثة للبيئة بواسطة البلازما. وقد كانت هذه الفضلات تدفن في باطن الأرض مما كان يتسبب في أخطار تلوث. وباستخدام البلازما يمكن حاليا التخلص من 200 كيلوجرام من المواد السامة في الساعة.

بلازما الطباعة الحجرية:

بوجه عام هي تكنولوجيا طباعة الدوائر الإلكترونية على سطوح الرقائق الدقيقة. وبالتفصيل يمكن توضيحها كالآتي: هي عملية تستخدم في الصناعات الدقيقة لاستقطاع أجزاء من سطح الحجم أو المادة المعرضة للعملية. تستخدم العملية الضوء لنقل مخطوط هندسي من قالب ضوئي (photo mask)، لمركب حساس للضوء (photo resist) يقبع على السطح المراد وضع التخطيط عليه، ثم تقوم سلسلة من العمليات الكيميائية بتحقيق تأثير الحفر المطلوب على سطح الشريحة . ويأتي سبب تسميتها بالطباعة الحجرية الضوئية لأنها تماثل الطباعة الحجرية المستخدمة في بعض أنواع الطباعة. ولكن تستخدم الضوء في نقل النماذج كما في التصوير الفوتوغرافي. تستخدم الطباعة الحجرية الضوئية عوضًا عن الطرق التقليدية لطباعة الدوائر الإلكترونية بسبب دقتها اللامتناهية، فهي تحقق تحكما كاملا في الشكل والحجم للعنصر المطبوع. وكذلك بسبب تماثل الوحدات المصنوعة تمامًا. فعيوب الصناعة أقل ما يمكن. العيب الأساسي في هذه التقنية هو لزوم استخدامها على

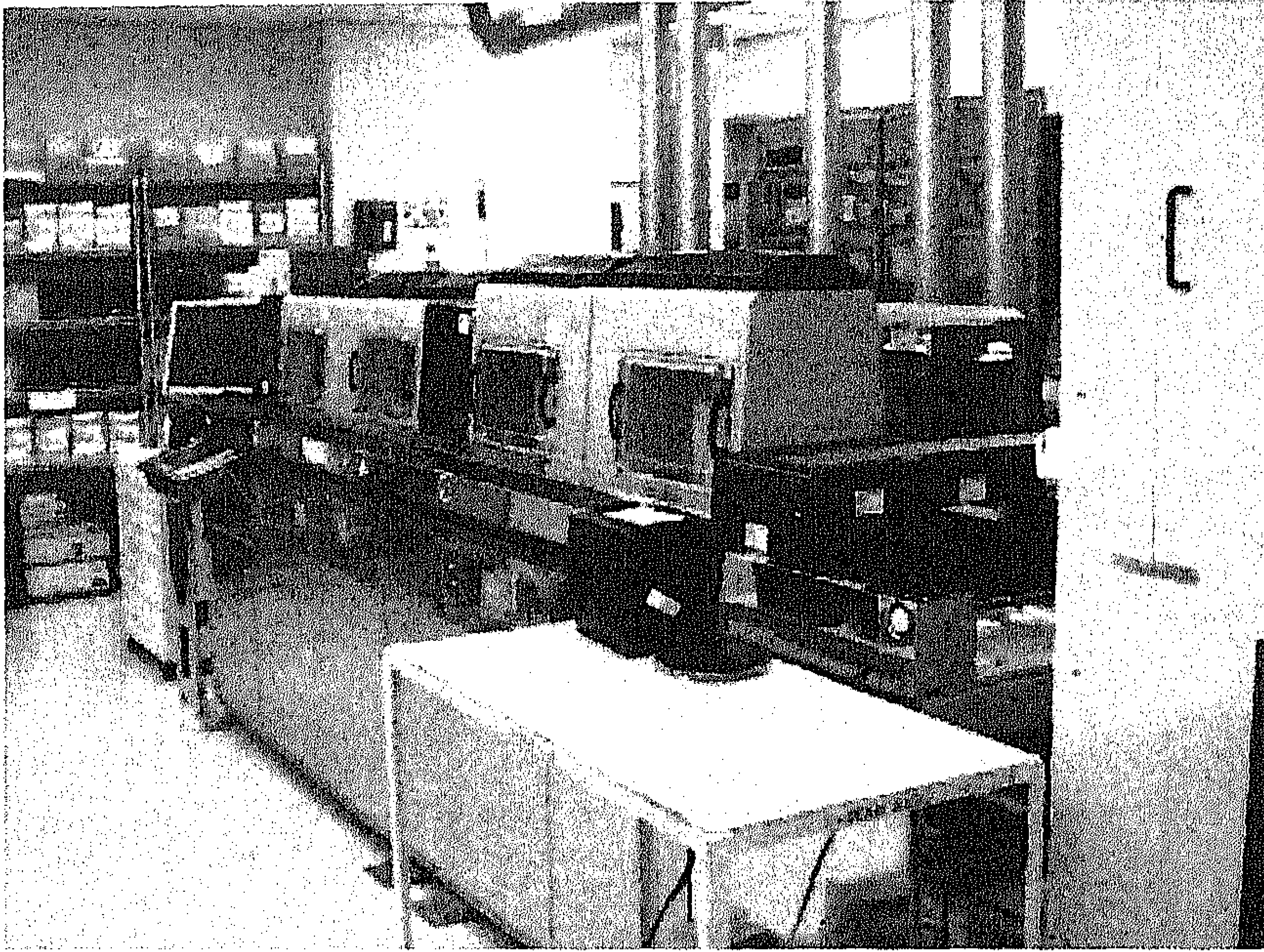
الأسطح المستوية فقط. وتتطلب شروط صارمة لنظافة الوسط في عملية الطباعة الحجرية عددًا من الخطوات. الغرف الإنتاجية بالغة النظافة المستخدمة حاليًّا في هذه الصناعة تستخدم آليات لأنظمة المعالجة المائية للشرائح:

أولًا: تسخن الشريحة لتبخير الرطوبة التي من الممكن وجودها على سطح الشريحة.

ثانيًا: تنظف الشرائح كيميائيًا لإزالة كل أنواع الأوساخ.

ثالثًا: يعالج السطح بمادة محفزة لالتصاق المادة الواقية للضوء بسطح الشريحة. مثل مادة hexamethyldisilazane (HMDS).

عند الطلاء بالواقي الضوئي تغطى الشريحة بالمادة الواقية للضوء. وهي سائل لزج يوزع بانتظام على سطح الشريحة. حيث ينشر السائل على سطح الشريحة وتدار الشريحة بسرعة عالية تتراوح بين 1200 و 4800 دورة في الدقيقة لمدة من 30 إلى 60 ثانية على حسب سمك الطبقة المطلوبة. حيث تتكفل هذه العملية بطرد الكميات الزائدة والنتوءات السائلة على سطح الشريحة وتخلق سطحًا متساوي الارتفاع سمكه بين نصف إلى 2.5 ميكرون (الميكرون 1000000/1 من المتر. ويرمز له بـ µm) ثم تسخن الشريحة المغطاة بالواقي للضوء لتبخير أية سوائل زائدة عند درجة حرارة من 90 إلى 100 سيليزية لمدة من 5 إلى 30 دقيقة. وأحيانًا تسخن الشريحة في وسط من غاز النيتروجين عند الحاجة لذلك. التعريض والتحميض بعد التسخين الأولي تعرض المادة الواقية للضوء لتدفقات قوية من الضوء ممثلة لمخطوط الشريحة. وتستخدم الطباعة الحجرية الضوئية الأشعة فوق البنفسجية بأطوال موجية ضئيلة في نطاق 300 نانومتر. وهي أكبر من الأطوال الموجية لأشعة X. والمادة الواقية للضوء الموجبة وهي النوع الأكثر استخداما تصبح أقل ثباتا كيميائيا، عند التعرض للأشعة السالبة تصبح أكثر ثباتا، وبسبب تغير الواقي الضوئي الكيميائي يمكن استخدام هذه الخاصية بطريقة خاصة تسمى التحميض كنفس المصطلح المطلق في التصوير الفوتوغرافي.



الشكل (8): صورة لجهاز الطباعة الحجرية الضوئية

(الشكل 8)صورة لجهاز (Alighner) وهو الوحدة الرئيسية في طريقة الطباعة الحجرية الضوئية. وهو يقوم بالعمليات بطريقة آلية بتحميل الشرائح الخام من جزء الجهاز بيسار الصورة إلى اليمين، ثم يقوم بتغطيتها بـ PR ثم تعرض للأشعة فوق البنفسجية (طول موجى 365 نانومتر في هذا الجهاز) ثم المرحلة النهائية المسماة development، حيث تستخدم المواد المذيبة لإزالة سواء PR الموجبة أو السالبة (المعرضة وغير المعرضة للأشعة بالترتيب) وفي الصندوق الأسود البلاستيكي بنهاية الجهاز تجمع الشرائح المصنعة. والإضاءة في تلك الغرفة صفراء. والصورة مأخوذة من معامل HP.

الملاحـــق

ملحق (1) : ثوابت فيزيائية

Charge of electron, e, 1.6×10^{-19}C
Avogadro's number, n_A, 6.02×10^{23} particles mol^{-1} at NTP (normal temperature and pressure, 20° C and 760 Torr)
Boltzmann's constant, $k = R_0 / n_A$, 1.38×10^{-23} Jk^{-1}
Electronvolt, eV, 1.6×10^{-19} J
Loschmid's number, n_L, 2.69×10^{23} particles m^{-3} in a gas at NTP
Mass of electron, m_e, 9.11×10^{-31} kg
Mass of proton (hydrogen atom), m_i, 1.67×10^{-27} kg
Mean free path (nitrogen), λ_h, 6.63×10^{-8} m at NTP
Permeability of free space μ_0, $4\pi \times 10^{-7}$ Hm^{-1}
Permittivity of free space ε_0, 8.85×10^{-12} Fm^{-1}
Planck's constant, h, 6.626×10^{-34} Js
Random velocity (nitrogen molecule), u_r, 509 ms^{-1} at NTP
Ratio of mass of proton to mass of electron, 1833
Universal gas constant, R_0, 8.31 JK^{-1} mol^{-1}
Stefan – Boltzmann constant, k_b, 5.67×10^{-8} W m^{-2} K^{-4}
Velocity of light, c_0, 3×10^8 ms^{-1}
1 bar = 760 Torr 101 kPa

ملحق (2) : وحدات الضغط

1 bar = 760 Torr = 100 kPa or 10^5 Pa
1 mbar = 100 Pa
1 Torr = 133 Pa
5 Torr = 0.133 Pa
101 kPa = 760 Torr = 1 atm = 10^5 Pa
1 kPa = 7.52 Torr
100 Pa = 0.752 Torr
1 Pa = 7.52×10^{-3} Torr
1 mPa = 7.52×10^{-6} Torr

ملحق (3) : رموز إلكترونية في بعض الدوائر

	air cored transformer
	amplifier
	capacitor
	diode
	discharge
	earth connection
	ferrite ring inductor

	IGBT
	inductor
	iron cored transformer
	MOSFET
	resistor
	thyristor

ملحق (4) : بعض العلاقات الأكثر شيوعا في البلازما

Electron plasma frequency $\omega_{pe} = \left(\frac{n_e e^2}{m_e \varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}}$

Ion plasma frequency $\omega_{pi} = \left(\frac{n_i e^2}{m_i \varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}}$

Electron cyclotron or gyro frequency $\omega_{ce} = \frac{eB}{m_e}$

Ion cyclotron or gyro frequency $\omega_{ci} = \frac{eB}{m_i}$

Debye length $\lambda_D = \left(\frac{k_B T_e \varepsilon_0}{n_e e^2}\right)^{\frac{1}{2}}$

Free electrons in Debye volume $N_D = \frac{4}{3} \pi n_e \lambda_D^3$

Velocity of electro-magnetic waves $\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}}$

Velocity of light in free space $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$

Impedance of free space $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$

Phase velocity $\upsilon_p = \frac{\omega}{k}$

Group velocity $\upsilon_g = \frac{d\omega}{dk}$

المراجـــع

(1) John Harry (2010) *Introduction to Plasma Technology*, WILEY-VCH Verlag & Co . KGaA, Weinheim
(2) Chen, F.F. (1984) *Introduction to Plasma Physics and Controlled* Fusion, 2nd edn, Plenum Press, New York.
(3) McDaniel, E .W . (1964) in Collision phenomena in ionised gas, in *Fundamentals of Gaseous Ionisation and Plasma Electronic* (ed . E . Nasser), John Wiley & Sons, Inc ., New York .
(4) Chen, F.F. (2007) *Advanced Plasma Technology*, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, pp . 99–116 .
(5) Raizer, Y.P., Schneider, M .N . and Yatsenko, N .A . (1995) *Radio-Frequency Capacitive Discharges*, CRC Press, Boca Raton, FL .
(6) Lister, G .G . (2001) Low-pressure discharge light sources, in *Low Temperature Plasma Physics* (eds Hippler, R ., Pfau, S ., Schmidt, M . and Schoenbach, K .H .), Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, pp . 387–404 .
(7) Hawkes, J . and Latimer, I . (1995) Lasers, *Theory and Practice*, Prentice-Hall, Hemel Hempstead .
(8) Riccardo d'Agostino, Pietro Favia, Yoshinobu Kawai, Hideo Ikegami, Noriyoshi Sato, and Farzaneh Arefi-Khonsari (2008) *Advanced Plasma Technology* Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim
Guile, A .E . (1986) The electric arc, in *The Physics of Welding*, 2nd edn (ed . J .F . Lancaster), Pergamon Press, Oxford
(9) Gunther, K . (2001) High-pressure plasma light sources, in *Low Temperature Plasma Physics* (eds R . Hippler, S . Pfau, M . Schmidt and K .H . Schoenbach), Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim
(10) Horowitz, P . and Hill, W . (1989) *The Art of Electronics*, 2nd edn, Cambridge University Press, Cambridge .
(11) Fridman G, Fridman A, Peddinghaus M, Balasubramanian M, Gutsol A, Friedman G (2005) From Plasma Biology to Plasma Medicine: Sterilization, Tissue Engineering, Treatment of Surface Wounds and Skin Diseases . in The 58th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC) . San Jose, CA, USA

(12) Xiandeng Hou and Bradley T . Jones (2000) *Inductively Coupled Plasma/Optical Emission Spectrometry* in Encyclopedia of Analytical Chemistry R .A . Meyers (Ed .) pp . 9468–9485 Ó John Wiley & Sons Ltd, Chichester

(13) T . J . Manning and W . R . Grow (1997), *Inductively Coupled Plasma -Atomic Emission Spectrometry*, Springer-Verlag, New York, INC .

(14) White Paper - A Tissue Study comparing the PlasmaJet® with Argon Enhanced Electrosurgery and Fluid Coupled Electrosurgery' Plasma Surgical Limited 2006 .

http://www .plasma .org

http://ar .wikipedia .org/wiki

http://www .arabnet5 .com/news .asp

http://htig .alafdal .net/t1877-topic

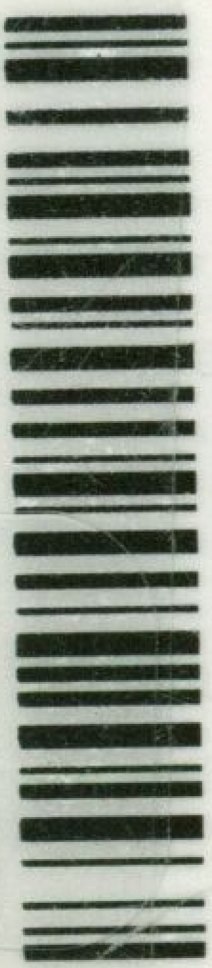
http://en .wikipedia .org/wiki/Plasma_(physics)

تكنولوجيا البلازما

البلازما هي الحالة الرابعة من حالات المادة، ويمكن وصفها بأنها غاز متأين تكون فيه الإلكترونات حرة وغير مرتبطة بالذرة أو الجزيء، وهي توجد فقط في التفاعلات النووية التي تحدث في أعماق النجوم وعلى أسطحها، وفي المفاعلات النووية حيث درجات الحرارة العالية والضغط المنخفض.

وثمة العديد من الصناعات التكنولوجية المعقدة التي تعتمد اعتمادًا كليًا على البلازما مثل صناعة الدوائر الكهربائية، وتصنيع الألماس، وتحويل الغازات السامة إلى غازات نافعة.

هذا فضلاً عن استخدام البلازما في الصناعة والتجارة وبحوث الفضاء والطب، بما تقدمه من مزايا تجمع بين الجودة النوعية والإنتاجية والتوافق البيئي والدقة والمرونة، وهو ما يجعل تكنولوجيا البلازما بابًا مهمًا لطرح الحلول الواعدة للاحتياجات المستقبلية والتحديات التي تتصدى لها البشرية والأجيال القادمة.





مكتبة الدار العربية للكتاب


9 789772 936946